

Вестник Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал

Vestnik of Don State Technical University

Том 17 № 4 2017

Vol. 17 no. 4 2017

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

4 Процессы и машины агроинженерных систем
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems

5 Безопасность деятельности человека
Safety of Human Activity

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 17, № 4

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
октябрь-декабрь 2017 г.

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)
Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также в международной базе EBSCO.
Донской государственный технический университет является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия) Подписано в печать 27.12.2017., дата выхода в свет 29.12.2017.Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 27/12 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции: 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

http://vestnik.donstu.ru/

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

VESTNIK of DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Theoretical and scientific-practical journal

4 issues a year
October-December 2017

Vol. 17, № 4

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published (State Commission for Academic Degrees and Titles List).
The journal is indexed and archived in the Russian Science Citation Index (RSCI), and in EBSCO International Database.
Don State Technical University is a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP) and Cross Ref

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 27.12.2017, imprint date 29.12.2017. Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order no. 27/12 Free price.
Founder's, publisher's and printery address: Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
http://vestnik.donstu.ru/
Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-66004 of 06.06.2016. issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

СОДЕРЖАНИЕ

МЕХАНИКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

CONTENT

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 534.143 10.23947/1992-5980-2017-17-4-5-13

Влияние геометрических и физических параметров на резонансные частоты ультразвуковых колебаний системы упругих и пьезоэлектрических элементов*

А. С. Скалиух[1], Т. Е. Герасименко[2], П. А. Оганесян[3], А. А. Соловьева[4]**
[1,2,3,4] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of geometric and physical parameters on resonant frequencies of ultrasonic vibrations of elastic and piezoelectric element system***

A. S. Skaliukh[1], T. E. Gerasimenko[2], P. A. Oganesyan[3], A. A. Solovieva[4]**
[1,2,3,4] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Введение. Исследованы резонансные частоты продольных колебаний системы, состоящей из цепочки разных по геометрическим и физическим параметрам элементов: пьезокерамического, упругого и акустического. Проведено сравнение результатов в пакетах COMSOL и ACELAN. Оценена зависимость значения первой собственной частоты от геометрических параметров. Исследовано влияние динамической вязкости на АЧХ продольных колебаний.

Материалы и методы. Для исследования выбрана система упругих и акустических элементов, позволяющая описывать работу ультразвукового режущего устройства. Возбудителем колебаний выступает пьезокерамический преобразователь, совершающий колебания по толщине. Концентратор колебаний и стержневой элемент принимаются в качестве упругих элементов и выполнены из нержавеющей стали. Имитатором режущего элемента выступает акустическая жидкость. Проведен модальный и гармонический анализ сложной системы, состоящей из разных по физическим свойствам элементов.

Результаты исследования. Построены осесимметричная и трехмерная конечноэлементные модели исследуемой системы. Для концентратора колебаний предложены различные виды кривизны и толщины звена с изменяемой формой поверхности. Получены первые собственные частоты продольных колебаний стержневого элемента, контактирующего с акустической жидкостью. Установлено хорошее согласие с результатами работы конечноэлементного пакета ACELAN. Получены амплитудно-частотные характеристики колебаний концевой части вблизи первой резонансной частоты. Отмечено, что вязкость акустической среды мало влияет на амплитуду колебаний упругого стержня и совсем не влияет на резонансную частоту.

Обсуждение и заключения. Гармонический и модальный анализ показал, что высокочастотные продольные колебания стержневого элемента значительно зависят от тангенса угла потерь упругих элементов и слабо зависят от вязкости контактирующей акустической среды. Полученные результаты могут представлять интерес при конструировании ультразвуковых режущих медицинских приборов.

Introduction. Resonance frequencies of the longitudinal oscillations are investigated for a system consisting of diverse geometrical and physical elements – piezoceramic, elastic, and acoustic ones. The results are compared in COMSOL and ACELAN packages. The dependence of the first eigenfrequency value on the geometric parameters is evaluated. The dynamic viscosity effect on the longitudinal oscillations FRF is studied.

Materials and Methods. The system of elastic and acoustic elements which allows describing the operation of an ultrasonic cutting device is selected for the study. The oscillator is a piezoelectric transducer which oscillates in thickness. An oscillation concentrator and a rod element are specified as elastic elements. They are made from stainless steel. The cutting element simulator is acoustic fluid. Modal and harmonic analysis of a complex system consisting of diverse physical elements is carried out.

Research Results. Axisymmetric and three-dimensional finite-element models of the investigated system are constructed. Various types of curvature and thickness of the link with changeable surface shape are proposed for the oscillation concentrator. The first eigenfrequencies of the longitudinal vibrations of the rod element contacting with the acoustic liquid are obtained. Good agreement with the results of the ACELAN finite-element package is established. The amplitude-frequency characteristics of the end oscillations near the first resonance frequency are obtained. It is notable that the acoustic medium viscosity has little effect on the oscillation amplitude of the elastic rod, and does not affect the resonance frequency at all.

Discussion and Conclusions. Harmonic and modal analysis has shown that the high-frequency longitudinal vibrations of the rod element depend significantly on the dissipation factor of the elastic elements, and depend weakly on the viscosity of the contacting acoustic medium. The results obtained may be of interest under designing ultrasonic cutting medical devices.

Механика

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17–08–00860–а).
**E-mail: a.s.skaliukh@gmail.com, tegerasimenko@sfedu.ru, paul.oganesyan@yandex.ru, solovievarc@gmail.com
*** The research is done with the financial support from RFFI (Grant no. 17–08–00860–a).

Ключевые слова: метод конечных элементов, пьезоэлектрический преобразователь, ультразвуковой скальпель, амплитудно-частная характеристика.

Образец для цитирования: Обеспечение надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей в среде стальных шаров / А. С. Скалиух, [и др.] Соловьева // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 4. — С. 5–13.

Keywords: finite-element method, piezoelectric transformer, harmonic scalpel, frequency-response analysis.

For citation: A.S. Skaliukh, T.E. Gerasimenko, P.A. Oganesyan, A.A. Solovieva. Effect of geometric and physical parameters on resonant frequencies of ultrasonic vibrations of elastic and piezoelectric element system. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 5–13.

Введение. Ультразвуковые скальпели позволяют проводить рассечение и коагуляцию тканей с целью остановки кровотечения [1–4]. Конструктивно такие приборы состоят из цепочки упругих и пьезокерамических (или магнитострикционных) элементов, собранных в единую систему, создающую максимальные продольные колебания режущему элементу на частотах от 20 до 50 КГц. Наиболее эффективным будет режим, при котором режущий элемент совершает продольные колебания на резонансной частоте. Под воздействием кавитации клеточной структуры прилегающих к лезвию слоев ткани сухое трение переходит в полусухое или даже жидкостное. Это приводит к существенному уменьшению как нормального, так и тангенциального усилия резания, но максимальная амплитуда колебаний и частота резонанса изменяются. Поэтому указанная в инструкциях к ультразвуковым скальпелям основная частота колебаний без учета нагрузки на режущий элемент вряд ли будет резонансной. С другой стороны, в цепочке упругих элементов содержится концентратор колебаний, позволяющий увеличить амплитуду продольных колебаний рассекающего элемента, форма и размеры которого влияют на амплитудно-частотные характеристики скальпеля. Еще одним важным элементом является пьезокерамический преобразователь, который может быть многосекционным, а может иметь и неоднородную предварительную поляризацию [5–7].

Для моделирования работы ультразвукового режущего прибора была рассмотрена конечноэлементная модель составной системы пьезокерамических и упругих элементов, один из которых имеет превалирующий над остальными продольный размер, с целью изучения влияния параметров физического и геометрического характера на его продольные колебания. Такая система близка к конструкции медицинского ультразвукового скальпеля и может быть использована при моделировании его работы.

Среди факторов, которые влияют на собственные частоты исследуемых колебаний, можно выделить три основные группы: геометрические параметры, материальные свойства, неоднородная поляризация пьезоэлемента. Кроме этого, при расчете рабочих характеристик учитывалась среда, с которой контактирует рассекающий элемент. С этой целью была использована модель вязкой акустической жидкости. Для анализа поведения скальпеля в различных типах тканей параметрами этой жидкости (например, вязкостью и плотностью) можно варьировать. Различные подходы к моделированию свойств живых тканей, в том числе и акустических жидкостей, представлены в [8, 9].

В данной работе построена параметризованная геометрия модели, проведена серия численных экспериментов и определены изменения собственных частот в зависимости от размеров отдельных элементов системы. Кроме того, были проанализированы амплитудно-частотные характеристики системы на частотах, близких к резонансу в зависимости от физических свойств акустической среды жидкости.

Материалы и методы. Для исследования была взята система, состоящая из цепочки упругих и пьезокерамических элементов, показанных на рис. 1.

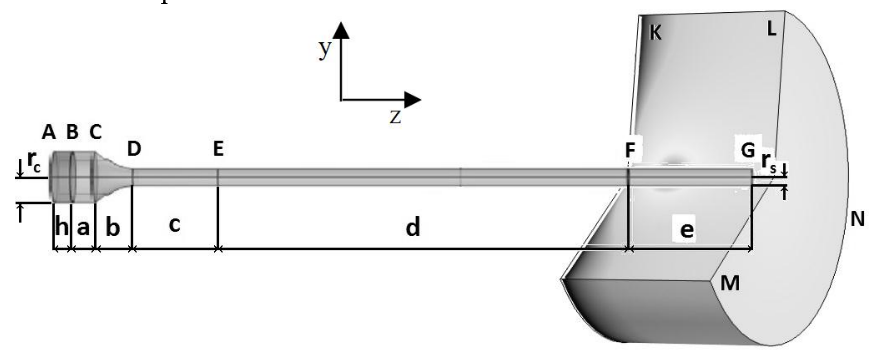


Рис. 1. Параметризованная геометрия модели скальпеля в осесимметричной и в трехмерной постановке в пакете COMSOL

Fig. 1. Parametrized scalpel model geometry in axisymmetric and three-dimensional setting in COMSOL package

Здесь участки AB, BD, DG — пьезокерамический элемент, концентратор колебаний и стержневой элемент соответственно. Все элементы имеют осесимметричное строение. Пьезоэлемент представляет собой цилиндрический пьезокерамический преобразователь с толщиной h и предварительной поляризацией, направленной по толщине. Электроды нанесены на лицевые поверхности пьезокерамического цилиндра, и на них подается разность потенциалов, из-

меняющаяся по гармоническому закону во времени. Материал концентратора колебаний и стержневого элемента — нержавеющая сталь. Контактное взаимодействие между преобразователем и концентратором колебаний и между концентратором и стержнем считается безотрывным. Сечение A преобразователя закреплено; на боковой поверхности имеет место гладкий жесткий контакт.

Последнее условие выполнено и для концентратора напряжений на участке BC длиной a. Остальная боковая поверхность длиной b свободна от механических напряжений. Для стержня принималось условие гладкого жесткого контакта на участке DE длиной c. На участке EF длиной d принимались нулевые напряжения. На участке FG длиной e и на его концевом сечении G имеет место сопряжение с акустической средой KLNM. При этом считалось, что на лицевой поверхности, проходящей через точку K, звуковое давление равно нулю, на боковой поверхности KL имеет место условие импедансного типа, а лицевая поверхность LNM — непроницаемая плоскость.

Каждая из отмеченных выше сред описывается линейными моделями, которые для упрощения представим в векторном виде.

Пьезокерамическая среда:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}=\rho\omega^2\mathbf{u};\qquad \boldsymbol{\sigma}=\mathbf{C}:\boldsymbol{\varepsilon}-\mathbf{e}^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{E};\qquad \boldsymbol{\varepsilon}=1/2(\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}});$$
$$\nabla\cdot\mathbf{D}=0;\qquad \mathbf{D}=\mathbf{e}:\boldsymbol{\varepsilon}+\text{э}\cdot\mathbf{E};\qquad \mathbf{E}=-\nabla\varphi; \tag{1}$$

в которой $\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\varepsilon},\mathbf{D},\mathbf{E},\mathbf{u},\varphi,\mathbf{C},\mathbf{e},\text{э},\rho,\omega$ — тензор напряжений, тензор деформаций, вектор электрического смещения, вектор электрического поля, вектор перемещения, электрический потенциал, тензор упругих постоянных, тензор пьезоэлектрических констант, тензор диэлектрических проницаемостей, плотность материала керамики и круговая частота соответственно.

Упругая среда:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}=\rho_k\,\omega^2\mathbf{u};\qquad \boldsymbol{\sigma}=\lambda_k\,\mathrm{tr}\,\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathbf{I}+2\mu_k\,\boldsymbol{\varepsilon};\qquad \boldsymbol{\varepsilon}=1/2(\nabla\mathbf{u}+\nabla\mathbf{u}^{\mathrm{T}}); \tag{2}$$

в которой $\boldsymbol{\sigma},\boldsymbol{\varepsilon},\mathbf{u},\mathbf{I},\lambda_k,\mu_k,\rho_k$ — тензор напряжений, тензор деформаций, вектор перемещения, единичный тензор, коэффициенты Ламе и плотность материала концентратора колебаний и стержня соответственно (k = 1,2). Затухание в этих материалах моделируется с помощью комплексных коэффициентов Ламе, и тангенс угла потерь равен 0,0001.

Акустическая среда:

$$\nabla\cdot\left(-\frac{1}{\rho_c}\nabla\mathrm{p}\right)-\frac{k_{eq}^2\,\mathrm{p}}{\rho_c}=0;\quad k_{eq}^2=\left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2;\quad c_c=c\left(1+i\omega\frac{\left(\frac{4\mu_a}{3}+\mu_b\right)}{\rho c^2}\right)^{0.5};\quad \rho_c=\frac{\rho c^2}{c_c^2}; \tag{3}$$

в которой $\mathrm{p},\rho,c,\mu_a,\mu_b$ — акустическое давление, плотность жидкости, скорость звука в ней, динамическая вязкость и второй коэффициент вязкости среды соответственно.

Граничные условия и условия сопряжения были подробно описаны выше, они очевидны, поэтому математические формулы для них выписываться не будут. Добавим только, что, если будут рассматриваться неоднородно поляризованные керамические таблетки, то упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические характеристики таких сред будут представлять функции координат области, занятой керамикой.

Для описания геометрии всех элементов системы были разработаны три конечноэлементные модели. Две осесимметричные модели были построены в пакетах ACELAN и COMSOL. Третья модель построена в пакете COMSOL для случая 3D.

В основе каждой модели лежит параметризованная геометрия, представленная на рис. 1, где также указаны независимые параметры, отвечающие за геометрию модели. В левой части системы расположен пьезокерамический цилиндр, выделенный более темным цветом. Следующий элемент — стальной концентратор колебаний, состоящий из двух геометрических компонентов: цилиндра и конусообразного переходника. В реальных конструкциях хирургических инструментов толщины преобразователя и радиусы концевых сечений концентратора связаны с длинами распространяющихся волн. В предлагаемом варианте мы отказались от дополнительных ограничений на геометрические параметры, чтобы иметь возможность получить более общие результаты. При этом в модель заложена возможность изменять функциональным образом диаметр конусообразной части. С этой целью образующая конуса в глобальных координатах в плоскости YZ описывается квадратичным уравнением:

$$y(z)=kz^2+k_1z+k_2;\qquad k_1=\frac{rs-rc+k(z_0^2-z_2^2)}{z_2-z_0};$$
$$k_2=rc-k_1z_0^2;\qquad z_0=hc+a;\qquad z_1=z_0+b,$$

которое позволяет проводить численные эксперименты для вогнутых и выпуклых профилей направляющей, изменяя лишь один параметр *k,* как это показано на рис. 2.

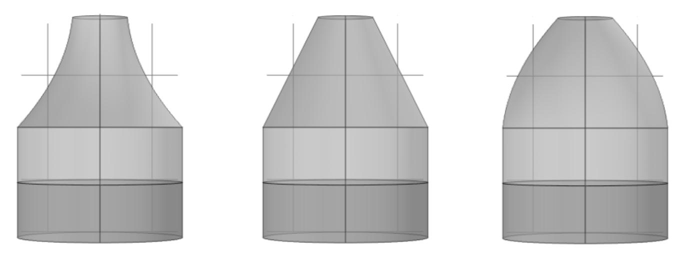


Рис. 2. Различные формы переходника между пьезоэлементом и стержнем (форма определяется параметром *k*)

Fig. 2. Various forms of the adapter between the piezoelectric cell and the rod (the shape is determined by the parameter k)

Следующий в цепочке упругих элементов — стержень, имитирующий тело рассекателя. Стержень разделен на три условные части, на каждой из которых задаются свои граничные условия, как говорилось выше. Акустическая часть также представлена на рис. 1 затемненным цветом и располагается справа. Для удобства в этой среде был сделан разрез, позволяющий оценить ее влияние на продольные колебания стержневой конструкции. Полный список независимых геометрических параметров приводится в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Изменяемые параметры модели

Model changing parameters

Обозначение	Начальное значение	Описание
r_c	7,5 мм	Радиус керамического диска
h	5 мм	Толщина керамического диска
a	5 мм	Толщина слоя металла
b	10 мм	Толщина переходника
r_s	2,5 мм	Радиус стержня
k	–80	Безразмерный параметр кривизны образующей конуса переходника
c	0,02	Длина начального сегмента стержня
d	0,2	Длина среднего сегмента стержня
e	0,03	Длина сегмента стержня, погруженного в жидкость
μ	Pa·s	Вязкость жидкости
ρ	1500 кг/м^3	Плотность жидкости
c_s	1900 м/с	Скорость звука в жидкости

Физические параметры жидкости, симулирующей поведение среды, с которой происходит контактное взаимодействие, находятся в нижней части этой таблицы. Это скорость распространения звука, плотность и динамическая вязкость (второй коэффициент вязкости принимался равным нулю). Более подробно математические модели электроупругих и упругих тел (1)–(2), нагруженных на акустическую среду (3), используемые в пакете ACELAN, представлены в [10].

Результаты исследования. Для осесимметричной и трехмерной моделей была проведена оценка качества конечноэлементных сеток. Задача на собственные значения решалась на сетках с различными размерами. Измельчение сетки продолжалось до тех пор, пока дальнейшее уменьшение размеров не начинало влиять на результат по заданной погрешности. В нашем случае результатом исследования была выбрана первая собственная частота резонанса продольных колебаний f_1. Продольные колебания отбирались посредством перебора собственных форм колебаний. В табл. 2 приведены результаты расчетов, по итогам которых определены оптимальные размеры сеток, позволяющие получить достоверные результаты с минимальным числом элементов.

Таблица 2
Table 2

Результаты подбора сеток

Grid selection results

	2D		3D	
Размер элемента [min; max] (м)	f_1 (Гц)	Степеней свободы	f_1 (Гц)	Степеней свободы
[6,8 ·10^{-4}; 0,034]	4900,8	827	5050	3300
[1,02·10^{-4}; 0,0228]	4900,3	1059	5011,4	6316
[1,02·10^{-4}; 0,018]	4900,1	1095	4934,7	22960
[4,25·10^{-5}; 0,0126]	4900,1	1559	4932,1	178816

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что для достижения заданной точности осесимметричная модель позволяет использовать значительно меньшее число степеней свободы. Так, с погрешностью $\delta = 0,6\%$ в осесимметричной модели можно взять в 115 раз меньше конечных элементов, что важно при решении задач оптимизации по параметрам. Однако в дальнейшем возникнет необходимость использовать трехмерную модель, когда будет учитываться неосесимметричный вид наконечника стержня и неосесимметричная форма внешних воздействий.

Первый этап численного эксперимента заключался в валидации моделей путем сравнения различных реализаций при решении задачи на собственные значения. Была отработана методика определения первых трех рабочих частот устройства, которые соответствуют продольным колебаниям стержня (в табл. 2 указано значение только первой из них).

Следующий шаг численных экспериментов заключался в сравнении результатов расчета собственных частот продольных колебаний, полученных разными моделями и разными конечноэлементными комплексами.

В частности, в пакете ACELAN была построена осесимметричная модель этой системы. В табл. 3 представлены результаты вычисления первых двух собственных частот.

Таблица 3
Table 3

Результаты решения задачи на собственные значения на оптимальных сетках в различных пакетах

Results of solving eigenvalue problem on optimal grids in various packages

Модель	f_1 (Гц)	f_2 (Гц)
ACELAN	4907	14711
COMSOL (2D)	4900,1	14691
COMSOL (3D)	4932,1	14782

Сравнение результатов показывает, что осесимметричные модели согласуются с очень высокой точностью. Разница между трехмерной моделью и осесимметричной может быть вызвана сложностью построения объемной сетки на наиболее тонких участках геометрии.

Возможности постпроцессора пакета COMSOL позволяют построить трехмерное изображение по итогам решения осесимметричной задачи. Здесь и далее в работе приводятся результаты постпроцессорной обработки решений осесимметричной задачи.

Была проведена оценка влияния геометрических параметров на собственные частоты (СЧ). На рис. 3 представлены зависимости СЧ от различных геометрических параметров.

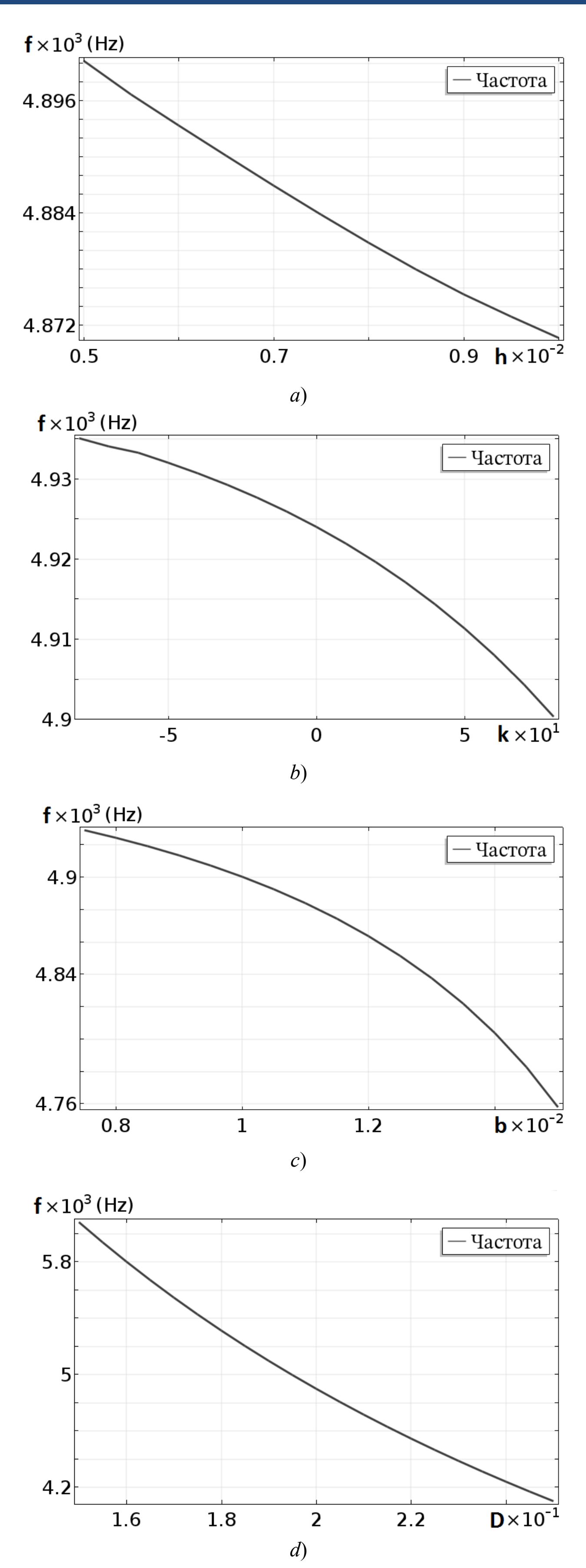


Рис. 3. Влияние на собственную частоту геометрических параметров: толщины h пьезопреобразователя (a); параметра кривизны k направляющей концентратора колебаний (b); толщины b концентратора колебаний (c); длины D стержня (d)

Fig. 3. Effect on eigenfrequency of geometric parameters: thickness h of piezoelectric transformer (a); curvature parameter k of oscillation concentrator guide (b); thickness b of oscillation concentrator (c); rod length D (d)

Из рисунков видно, что с увеличением толщины преобразователя, равно как и с увеличением длины стержневой части, первая собственная частота уменьшается. Это уменьшение будет значительным, когда приходится увеличивать длину стержневой части, но практически отсутствует при малом изменении толщины преобразователя. Характерно, что на собственную частоту также практически не влияет кривизна концентратора напряжений и его длина.

Другой важной характеристикой является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) продольных колебаний вблизи резонансных частот. Так, на рис. 4 приведены результаты расчета АЧХ продольных колебаний вблизи резонансной частоты при определенных значениях независимых физических и геометрических параметров.

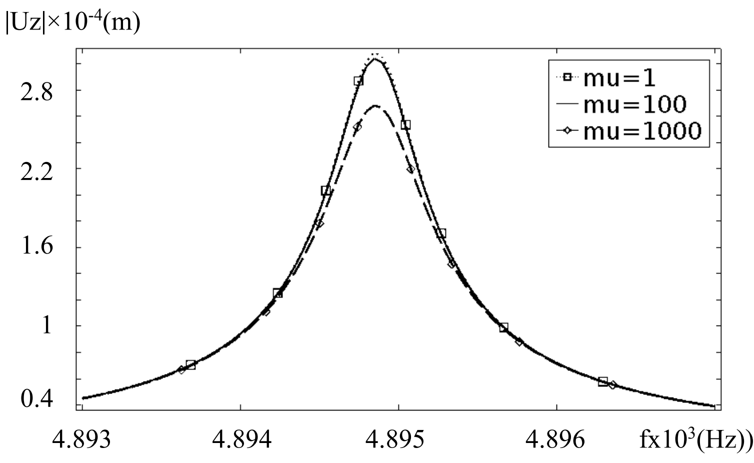


Рис. 4. АЧХ вынужденных колебаний скальпеля при различных значениях вязкости

Fig. 4. FRF of forced scalpel oscillations at various values of viscosity

Расчеты проводились с учетом акустической жидкости, в которую вставлен конец стержневой части. Воздействие акустической жидкости приводит к демпфированию, при котором частота резонанса меняется в зависимости от свойств среды. На рис. 4 изображены АЧХ продольных колебаний для различных значений динамической вязкости. Второй коэффициент вязкости принимался равным нулю.

Интересно отметить, что при изменениях вязкости акустической среды в большом диапазоне АЧХ изменяется незначительно. Отсюда можно сделать вывод, что основным фактором, влияющим на амплитуду колебаний в окрестности первого резонанса продольных колебаний, является затухание в упругой среде. Таким образом, увеличение вязкости акустической среды более чем на порядок не приводит к значительному снижению амплитуды колебаний стержневого звена. Интересно также отметить, что вязкость оказывает влияние на амплитуду колебаний, но не на частоту. Это может быть связано с небольшой площадью сечения скальпеля.

Обсуждение и заключения. В настоящей работе были исследованы резонансные частоты продольных колебаний системы, состоящей из цепочки разных по физическим параметрам элементов: пьезокерамического, двух упругих и акустического. С этой целью были построены осесимметричные и трехмерные конечноэлементные модели. Для сравнения были выбраны два конечноэлементных пакета COMSOL и ACELAN. Обнаружено хорошее совпадение результатов по собственным частотам для осесимметричной задачи. Построенная трехмерная модель послужит в дальнейшем при моделировании несимметричных задач. Проведены оценки влияния геометрических параметров на значение первой собственной частоты. В частности, рассмотрены варианты, в которых варьировались следующие параметры: толщина пьезопреобразователя; кривизна и толщина концентратора колебаний; длина стержневого звена. Другим важным параметром исследования явилась АЧХ продольных колебаний вблизи первой резонансной частоты. Отмечено, что малое изменение динамической вязкости акустической среды мало влияет на эту характеристику. А заметное увеличение этой вязкости приводит лишь к снижению амплитуды колебаний, но практически не изменяет частоту резонанса. Полученные результаты могут представлять интерес при конструировании ультразвуковых режущих медицинских приборов.

Библиографический список

1. Лощилов, В. И. К вопросу о механизме ультразвуковой резки биологических тканей / В. И. Лощилов, С. М. Волков // Труды МВТУ. — 1973. — № 165. — С. 29–33.

2. Акопян, В. Б. Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов ; под ред. С. И. Щукина. — 2–е изд., испр. и доп. — Москва : Юрайт, 2017. — 223 с. — (Университеты России).

3. Дубровский, В. И. Биомеханика / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. — Москва : ВЛАДОС-пресс, 2003. — 672 с.

4. Carovac, A. Application of Ultrasound in Medicine / A. Carovac, F. Smajlovic, D. Junuzovic // Acta Informatica Medica. — 2011. — № 19 (3). — P. 168–171.
5. Dong, S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators / S. Dong // Journal of Advanced Dielectrics. — 2012. — Vol. 2, № 1. — P. 1230001–1230019.
6. Liu, D.-K.-C. A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics / D.-K.-C. Liu, J. Friend, L. Yeo // Acoustical Science and Technology. — 2010. — № 31 (2). — P. 115–123.
7. Skaliukh, A. The general theory of polarization of ferroelectric materials / A. Skaliukh, G. Li // Advanced Materials. Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. — Cham : Springer, 2015. — Vol. 28. — P. 393–412.
8. Vykhodtseva, N. I. Pulse duration and peak intensity during focused ultrasound surgery: theoretical and experimental effects in rabbit brain in vivo / N. I. Vykhodtseva, K. Hynynen, C. Damianou // Ultrasound in medicine & biology. — 1994. — Vol. 20, is. 9. — P. 987–1000.
9. Duck, F.-A. Physical properties of tissue: a comprehensive reference book / F.-A. Duck. — London : Academic Press, 1990. — 336 p.
10. Белоконь, А. В. Новые схемы конечноэлементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств / А. В. Белоконь, А. В. Наседкин, А. Н. Соловьев // Прикладная математика и механика. — 2002. — Т. 66, № 3. — С. 491–501.

References

1. Loshchilov, V.I., Volkov, S.M. K voprosu o mekhanizme ul'trazvukovoy rezki biologicheskikh tkaney. [Revisiting mechanism of ultrasonic cutting of bio-tissues.] Trudy MVTU im. Baumana, 1973, no. 165, pp. 29–33 (in English).
2. Akopyan, V.B., Yershov, Y.A. Ul'trazvuk v meditsine, veterinarii i biologii. [Ultrasound in medicine,veterinary science, and biology.] Shchukin, S.I., ed., 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Yurayt, 2017, 223 p. (in English).
3. Dubrovskiy, V.I., Fedorova, V.N. Biomekhanika. [Biomechanics.] Moscow: VLADOS-press, 2003, 672 p. (in English).
4. Carovac, A., Smajlovic, F., Junuzovic, D. Application of Ultrasound in Medicine. Acta Informatica Medica, 2011, no. 19 (3), pp. 168–171.
5. Dong, S. Review on piezoelectric, ultrasonic, and magnetoelectric actuators. Journal of Advanced Dielectrics, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 1230001–1230019.
6. Liu, D.-K.-C., Friend, J., Yeo, L. A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics. Acoustical Science and Technology, 2010, no. 31 (2), pp. 115–123.
7. Skaliukh, A., Li, G. The general theory of polarization of ferroelectric materials. Advanced Materials. Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Cham: Springer, 2015, vol. 28, pp. 393–412.
8. Vykhodtseva, N.I., Hynynen, K., Damianou, C. Pulse duration and peak intensity during focused ultrasound surgery: theoretical and experimental effects in rabbit brain in vivo. Ultrasound in medicine & biology, 1994, vol. 20, iss. 9, pp. 987–1000.
9. Duck, F.-A. Physical properties of tissue: a comprehensive reference book. London: Academic Press, 1990, 336 p.
10. Belokon, A.V., Nasedkin, A.V., Soloviev, A.N. Novye skhemy konechnoelementnogo dinamicheskogo analiza p'yezoelektricheskikh ustroystv. [New schemes of finite element dynamic analysis of piezoelectric devices.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2002, vol. 66, no. 3, pp. 491–501 (in English).

Поступила в редакцию 19.10.2017
Сдана в редакцию 19.10.2017
Запланирована в номер 30.10.2017

Received 19.10.2017
Submitted 19.10.2017
Scheduled in the issue 30.10.2017

Об авторах:

Скалиух Александр Сергеевич,
доцент кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2934–4555
a.s.skaliukh@gmail.com

Authors:

Skaliukh, Alexander S.,
associate professor of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2934–4555
a.s.skaliukh@gmail.com

Герасименко Татьяна Евгеньевна,
ассистент кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2797-8415
tegerasimenko@sfedu.ru

Gerasimenko, Tatyana E.,
teaching assistant of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2797-8415
tegerasimenko@sfedu.ru

Оганесян Павел Артурович,
научный сотрудник кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2311–7562
paul.oganesyan@yandex.ru

Oganesyan, Pavel A.,
research scholar of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000–0003–2311–7562
paul.oganesyan@yandex.ru

Соловьева Анна Аркадиевна,
магистрант кафедры «Математическое моделирование» Южного федерального университета (РФ, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3816-8186
solovievarc@gmail.com

Solovieva, Anna A.,
undergraduate of the Mathematical Modeling Department, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, ul. Milchakova, 8a),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3816-8186
solovievarc@gmail.com

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.38:519.8 10.23947/1992-5980-2017-17-4-14-21

Исследование методик определения констант поляризованной пьезокерамики (часть II)*

В. В. Мадорский[1**]

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on polarized piezoceramics constant techniques definition (Part 2)***

V. V. Madorsky[1**]

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена определению полного набора всех десяти электроупругих модулей поляризованной керамики, который необходим для анализа работы пьезокерамических чувствительных элементов различных приборов при численном решении краевых задач методом конечных элементов.

Целью данной работы является создание нового метода определения констант пьезокерамических материалов, основанного на измерении частот резонансов и первых низкочастотных антирезонансных частот только на одном образце в виде кольца.

Материалы и методы. Предложен новый метод определения полного набора упругих, пьезоэлектрических, диэлектрических модулей поляризованной пьезокерамики. При этом используется только один образец. Метод определения констант керамики основан на измерении резонансных частот и первого низкочастотного антирезонанса для элемента в виде кольца с осевой поляризацией. Первые семь констант, кроме сдвиговых, измеряют для кольца с электродами на торцах. Сдвиговые модули измеряют на том же кольце, но с новыми электродами на боковых цилиндрических поверхностях. Старые электроды на торцах удаляются. Для проверки корректности методики используется программа *ANSYS*, реализующая метод конечных элементов.

Результаты исследования. Для пьезокерамики *PZT*4 приведен полный набор констант, определенных новым методом — с использованием только одного образца. Погрешность определения констант, как правило, не превышает 1 %.

Обсуждение и заключения. В работе приведены результаты исследований нового обоснованного численного метода и алгоритма определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамики на одном образце в виде кольца с различными электродами. Главное достоинство данного метода — для определения полного набора модулей пьезокерамики используется только один образец. В других методах измеренные модули пьезокерамики не являются совместимыми в силу того, что частоты резонансов и антирезонансов измеряются на трех различных по геометрии и степени поляризации образцах.

Introduction. The complete set of all ten electro-elastic moduli of the polarized ceramics essential for the analysis of piezoceramic sensing elements of various devices under the numerical solution to boundary value problems by the finite element method is considered. The work objective is to develop a new technique for determining constants of piezoelectric materials based on measuring the resonance frequencies and the first low-cycle antiresonance frequencies on one ring-like sample only.

Materials and Methods. A new method of determining the full set of elastic, piezoelectric, and dielectric moduli of the polarized piezoelectric ceramics is proposed. Therewith, one sample only is used. This method is based on measuring the resonance frequencies and the first underfrequency antiresonance for an element in the form of an axial polarization ring. The first seven constants, apart from shear ones, are measured for the ring with electrodes on the ends. Shear moduli are measured on the same ring but with new electrodes on the lateral cylindrical surfaces. Old electrodes on the ends are removed. The ANSYS program implementing the finite element technique is used to validate the methodology.

Research Results. For PZT4 piezoelectric ceramics, the complete set of constants defined by a new method – using only one sample – is given. The accuracy of determining the constants, as a rule, does not exceed 1%.

Discussion and Conclusions. The paper presents the research results of a new valid numerical method and algorithm for determining the full set of compatible material constants of the piezoelectric ceramics on a single ring-like sample with different electrodes. The primary advantage of this method is that only one sample is used to determine the complete set of piezoceramic moduli, whereas in other methods, the measured piezoelectric moduli are not compatible since the frequencies of the resonances and antiresonances are measured at three samples different in geometry and degree of polarization.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: epohrbats@Gmail.com

***The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая керамика, определение полного набора констант, метод резонанса — антирезонанса, кольцо, метод конечных элементов, программа *ANSYS*, метод возмущений.

***Образец для цитирования*:** Мадорский, В. В. Исследование методик определения констант поляризованной пьезокерамики (часть II) / В. В. Мадорский // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 14–21.

Keywords: piezoelectric ceramics, definition of full set of constants, resonance — antiresonance method, ring, finite element method, ANSYS program, perturbation approach.

For citation: V.V. Madorsky. Study on polarized piezoceramics constant techniques definition (Part 2). Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 14–21.

Введение. Для анализа работы пьезокерамических чувствительных элементов различных приборов необходим полный набор электроупругих модулей: пять упругих, три пьезоэлектрические и две диэлектрические константы. Для определения полного набора электроупругих постоянных известными методами (например, наиболее широко применяемым методом «резонансов — антирезонансов» [1, 2]) необходимы измерения характеристик трех типоразмеров: стержней, пластин или дисков с колебанием по толщине и пластин, работающих на сдвиг. Главные недостатки данного метода:

— как показано в [3], сложно определить (измерить) на измерительном стенде частоты «антирезонанса» для высокочастотных колебаний;

— для поляризации стержней с межэлектродным расстоянием порядка 10–20 мм часто требуются электрические напряжения до 100–200 кВ;

— необходима дополнительная проверка совместимости значений полного набора электроупругих констант путем сравнения значений коэффициента связи k_{t}, измеренного из толщинных колебаний и определенного расчетным путем по результатам измерений на образцах виде стержней [1];

— при колебаниях сдвига, согласно [1], края пластины необходимо «демпфировать вязким материалом (жидкость, резина, клей и др.)».

В силу того, что константы пьезокерамических материалов (ПКМ) определяются на различных образцах, они (константы) могут считаться совместимыми только при устранении вышеперечисленных недостатков. Однако большинство экспериментальных данных свидетельствует о существенной неоднородности физических свойств ПКМ, возникающей в процессе спекания и поляризации пьезоэлементов, имеющих различные геометрические формы [4].

Целью данной работы является создание нового метода определения констант ПКМ, основанного на измерении частот резонансов и первых антирезонансных частот на **одном** образце в виде кольца.

Это достигается тем, что первые семь констант (s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{33}, d_{31}, d_{33}, ε_{33}^{T}) измеряют на пьезокерамическом элементе в виде кольца с осевой поляризацией и с электродами на торцах, а сдвиговые модули (s_{44}, d_{15}, ε_{11}^{T}) измеряют на том же кольце, но с новыми электродами на боковых цилиндрических поверхностях (старые электроды на торцах удаляются).

В настоящей работе для проверки корректности методики получено численное решение краевых задач методом конечных элементов. В качестве программы, реализующей метод конечных элементов, используется *ANSYS* [5].

Материалы и методы

1. Методика определения констант материала, кроме сдвиговых, для кольца с электродами на торцах. Рассмотрим пьезоэлектрическое кольцо толщиной $2h$ и радиусами a и b ($a > b$). Введем цилиндрическую систему координат (r, Θ, z), причем ось z совпадает с направлением оси поляризации. Координатная плоскость $z = 0$ совпадает со срединной плоскостью кольца.

Основываясь на известных линейных пьезоэлектрических соотношениях [6], уравнения осесимметричных колебаний кольца можно записать в следующем виде:

$$T_{rr,\,r} + T_{rz,\,z} + (T_{rr} - T_{\theta\theta})/r + \rho\omega^2 U = 0, \qquad (1)$$
$$T_{rz,\,r} + T_{rz}/r + T_{zz,\,z} + \rho\omega^2 W = 0,$$
$$D_{r,\,r} + D_r/r + D_{z,\,z} = 0.$$

Здесь и далее введены следующие обозначения и определения: U, W — механические смещения по осям r, z соответственно; ω — круговая частота; ρ — плотность; T_{mn} — механические напряжения; D_r, D_z — компоненты вектора электрической индукции $\boldsymbol{D}$. Запятая обозначает дифференцирование по символу, следующему за запятой.

В случае осевой поляризации уравнения состояния в цилиндрических координатах можно записать в следующем виде:

$$T_{rr} = c_{11}\,U,_r + c_{12}\,U/r + c_{13}\,W,_z + e_{31}\,\varphi,_z, \qquad (2)$$
$$T_{\theta\theta} = c_{12}\,U,_r + c_{11}\,U/r + c_{13}\,W,_z + e_{31}\,\varphi,_z$$
$$T_{zz} = c_{13}\,U,_r + c_{13}\,U/r + c_{33}\,W,_z + e_{33}\,\varphi,_z$$
$$T_{rz} = c_{44}\,U,_z + c_{44}\,W,_r + e_{15}\,\varphi,_r$$

$$D_r = e_{15}(U_{,z} + W_{,r}) - \varepsilon_{11}\varphi_{,r};\ D_z = e_{31}(U_{,r} + U/r) + e_{33}W_{,z} - \varepsilon_{33}\varphi_{,z}.$$

В соотношениях (2) и далее введены следующие обозначения:

— c_{mn} — упругие постоянные в матричном обозначении, измеренные на образцах с закороченными электродами или при электрическом поле $\boldsymbol{E} = const$;

— e_{mn} — пьезоконстанты;

— ε_{mn} — диэлектрические проницаемости для зажатого образца;

— φ — электрический потенциал.

Будем считать, что на электродированных торцах кольца и на боковых поверхностях кольца a, b заданы граничные условия:

$$z = \pm h\ T_{zz} = 0;\ T_{rz} = 0;\ \varphi = \pm V; \qquad (3)$$
$$r = a, b\ T_{rr} = 0;\ T_{rz} = 0;\ D_r = 0.$$

В (3) величина $2V$ — подведенная к торцам электрическая разность потенциалов.

Решение данной краевой задачи (1–3) состоит из суммы двух решений:

— однородного решения при нулевых граничных условиях при $z = \pm h$;

— частного решения, удовлетворяющего только условиям на торцах $z = \pm h$.

Не составляет труда построить частное решение $D_z = const$ и $D_r = 0$, которое автоматически удовлетворяет третьему уравнению из (3). Механические и электрические составляющие частного решения равны:

$$T_{rr}^{\ 0} = T_{\theta\theta}^{\ 0} = A(e_{31} + c_{13}\,\varepsilon_{33}/\,e_{33})\ \beta\sin(\beta\varsigma)/h + e_{31}K/h;\ U^0 = 0; \qquad (4)$$
$$\varphi^0 = K\varsigma + A\sin(\beta\varsigma);\ D_z^{\ 0} = -\varepsilon_{33}\,K/h;\ T_{zz}^{\ 0} = e_{33}\,K/h + A\beta\, e_{33\text{p}}\cos(\beta\varsigma)/h.$$

В (4) и далее введены следующие обозначения:

— безразмерные координаты $\varsigma = z/h$, $\xi = r/a$;

— безразмерная частота $\Omega^2 = \rho(\omega h)^2/c_{44}$;

— $\beta^2 = c_{44}\,\Omega^2/c_{33}^{\ D}$;

— $e_{33\text{p}} = e_{33} + c_{33}\,\varepsilon_{33}/e_{33}^{\ 2}$;

— $k_t^{\ 2} = 1 - c_{33}/c_{33}^{\ D}$; (5)

— коэффициенты $A = -Ve_{33}/(e_{33p}\,(\beta\cos(\beta) - k_t^{\ 2}\sin(\beta)))$;

— $K = V/(1 - k_t^{\ 2}\,\text{tg}(\beta)/\beta)$.

Построение однородных решений при условии, что вектор внешних усилий и электрический потенциал равны нулю на торцевых поверхностях, связано с определением корней дисперсионного уравнения. Для симметричных колебаний дисперсионное уравнение имеет вид [7]:

$$a_n\,M_n\,cth\,(\beta_n) = 0\ (n = 1, 2, 3). \qquad (6)$$

В (6) введены следующие обозначения:

$$a_n = -\alpha^2\,c_{13}\,k_{1n} + c_{33}\,k_{2n} + e_{33}\,k_{3n};\ b_n = k_{1n}\,\beta_n + k_{2n}; \qquad (7)$$
$$M_1 = b_2\,k_{33} - b_3\,k_{32};\ M_2 = b_3\,k_{31} - b_1\,k_{33};\ M_3 = b_1\,k_{32} - b_2\,k_{31},$$

где величина k_{mn} — алгебраические дополнения элементов третьей строки определителя системы для симметричных колебаний (1); β_n — корень бикубического уравнения из [7].

Для нахождения корней α при заданных значениях Ω необходимо совместно решить дисперсионное и бикубическое уравнения. Подробный анализ корней дисперсионного уравнения симметричных колебаний для пьезоэлектрического слоя приведен в [7].

Построенное однородное решение должно удовлетворять следующим граничным условиям на боковых поверхностях кольца при $r = a$, b:

$$\sigma_{rr} = -T_{rr}^{\ 0};\ \sigma_{rz} = 0;\ d_r = 0, \qquad (8)$$

где σ_{rr}, σ_{rz} — механические напряжения, d_r — компонента вектора электрической индукции для однородного решения.

Именно сумма частного и однородного решений позволит удовлетворить граничным условиям (3) как на торцах, так и на боковых поверхностях кольца.

Здесь остановимся на таком известном явлении, как толщинный резонанс, или «толщинный парадокс». С одной стороны, важным свойством толщинного резонанса является независимость собственной частоты от радиуса и простота его определения по формуле

$$1 - k_t^{\ 2}\,\text{tg}(\beta)/\beta = 0. \qquad (9)$$

Для толщинных колебаний считалось, что поперечное волновое число $\alpha = 0$ — таким образом, теория толщинных колебаний одномерная.

С другой стороны, многочисленные данные [8–10] о рельефе осесимметричных колебаний торцевых поверхностей при толщинных резонансах исследуемых ПКМ демонстрируют сильную зависимость перемещения W от радиуса. При этом не обнаружено ни одного толщинного резонанса с приблизительно поршневым движением торцевых поверхностей даже в случае малой относительной толщины исследуемых образцов. Более того, движение различных

участков этих поверхностей может быть противофазным. Представленные данные позволяют утверждать, что эти высокочастотные колебания не могут быть описаны с помощью одномерных идеализированных теорий.

В данной работе дано объяснение этому «толщинному парадоксу». В частном решении (4), (5) и в граничных условиях для однородного решения (8) существует общий множитель $1/(1 - k_t^2\,\mathrm{tg}(\beta)/\beta)$ и очевидно, что и частное, и однородное решения могут одновременно удовлетворять условию толщинного резонанса (9). При этом движения больших торцевых поверхностей не будут близки к поршневому движению из-за сложного по форме однородного решения (в области толщинного резонанса имеются три дисперсионные кривые $\Omega(\alpha)$, и решение зависит от координат r, z [7]).

Как видно из построенного частного решения для пьезоэлектрического слоя при поляризации по толщине и с электродами на торцах, условие толщинного резонанса в виде (9) будет одинаковым как для диска, так и для кольца или пластины. Это было подтверждено и численным анализом с помощью программы *ANSYS*. Для кольца это впервые было показано в [8].

В предлагаемом ниже методе упругие податливости s_{11}, s_{12} и s_{13}, измеренные на образцах с закороченными электродами или при постоянном электрическом поле, определяются с помощью измеренных трех первых последовательных резонансов кольца.

Пьезомодуль d_{31} определяем из измеренной первой низкочастотной антирезонансной частоты. Диэлектрическую константу $\varepsilon_{33}{}^T$ свободного образца рассчитаем из измеренной емкости кольца на частоте 1 КГц. Упругую константу $c_{33}{}^D$ и коэффициент связи k_t измеряем из первых двух резонансных частот толщинных колебаний.

Решение обратной задачи, или определение модулей керамики из критических частот, удобнее проводить приближенными методами, основанными на учете толщинных поправок в решении для кольца. В данной работе решение ищем в виде разложения по малому параметру — относительной частоте Ω^2:

$\alpha^2 = t\Omega^2 + \gamma\Omega^4 + \eta\Omega^6\ldots$

$$U = U_0 + \Omega^2 U_2 + \Omega^4 U_4 + \ldots \qquad (10)$$

Здесь α — безразмерное волновое число или корень дисперсионного уравнения (6); t, γ, η — неизвестные постоянные, зависящие от модулей пьезокерамики; U_n — вектор, составляющие которого U (U, W, φ).

Опуская громоздкие выкладки и ограничиваясь членами с Ω^6 для определения волнового числа α^2 и Ω^4 для смещений U в (10), приведем конечный результат рассматриваемой краевой задачи с граничными условиями (3) на торцах:

$$t = c_{44}/c^P{}_{11};\ \gamma = t^2(c_{13}/c_{33})^2/3;\ c_{13}/c_{33} = -s_{13}/(s_{11}+s_{12}); \qquad (11)$$

$$c^P{}_{11} = c_{11} - c^2{}_{13}/c_{33} = 1/(s_{11}(1-\nu^2));\ \nu = -s_{12}/s_{11};$$

$$\eta = t^3\{2/9\,(c_{13}/c_{33})^4 + (c_{13}/c_{33})^2/3\,[\,2/15\,(c_{13}/c_{33}) + 2/5\,c^P{}_{11}/c_{33} - (c_{13}/c_{33})^2/3 + piezo]\};$$

$$piezo = 1/45\,(c_{13}/c_{33})^2\,[(d_{31}/(s_{11}+s_{12}) - c^P{}_{11}(2d_{31}\,(c_{13}/c_{33}) + d_{33}))/(\varepsilon_{33}{}^T(1-k_p{}^2))].$$

Далее введем следующие определения и обозначения:

$k_p{}^2$ — планарный коэффициент связи;

$\alpha^2{}_0 = t\Omega^2$ — приближенное волновое число нулевого порядка;

$\alpha^2{}_2 = t\Omega^2 + \gamma\Omega^4$ — приближенное волновое число второго порядка;

$\alpha^2{}_4 = t\Omega^2 + \gamma\Omega^4 + \eta\Omega^6$ — приближенное волновое число четвертого порядка.

В табл. 1 представлены результаты точного решения волнового числа α из дисперсионного уравнения (6) и приближенный расчет из (10) и (11) для $\varepsilon = 0{,}033$ для различных приближений.

Таблица 1

Table 1

Пример расчета волнового числа α для различных частот для рассматриваемого пьезокерамического кольца

Calculation example of wave number α for various frequencies for piezoceramic ring under study

f, КГц	Ω	α из (6) точное решение	α_0	α_2	α_4 с *piezo* = 0	α_4
50	0,085	0,045055	0,045049	0,045055	0,045055	0,045055
250	0,425	0,22605	0,22524	0,22603	0,22605	0,22605
500	0,85	0,45742	0,45049	0,45676	0,45744	0,45741
700	1,1903	0,65168	0,63068	0,64777	0,65138	0,65123

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что для рассматриваемого кольца с толщиной 1 мм для частот до 700 КГц расчет волновых чисел из дисперсионного уравнения и приближенный расчет для α_4 практически совпадают, а пьезоэлектрической поправкой *piezo* можно пренебречь.

Частотное уравнение, соответствующее низкочастотным колебаниям, для колебаний кольца с учетом его относительной толщины $\varepsilon = h/a$ имеет вид:

$$a_{11}\, a_{22} - a_{12}\, a_{21} = 0. \quad (12)$$

Здесь $a_{11} = F_1(x_1)\,[1 + \alpha_0^2\, c_{13}/c_{33}(1/3 + (c_{13}/6c_{33}))] - 1/3\,(\alpha_0\, c_{13}/c_{33})^2 J_0(x_1)$;

$$a_{12} = F_2(x_1)\,[1 + \alpha_0^2\, c_{13}/c_{33}(1/3 + (c_{13}/6c_{33}))] - 1/3\,(\alpha_0\, c_{13}/c_{33})^2 N_0(x_1);$$

$$a_{21} = F_1(x_2)\,[1 + \alpha_0^2\, c_{13}/c_{33}(1/3 + (6c_{13}/c_{33}))] - 1/3\,(\alpha_0\, c_{13}/c_{33})^2 J_0(x_2);$$

$$a_{22} = F_2(x_2)\,[1 + \alpha_0^2\, c_{13}/c_{33}(1/3 + (c_{13}/6c_{33}))] - 1/3\,(\alpha_0\, c_{13}/c_{33})^2 N_0(x_2);$$

$$x_1 = \alpha_4/\varepsilon;\ x_2 = x_1\, b/a;\ F_1(x) = xJ_0(x) - (1-\nu)J_1(x)];\ F_2(x) = xN_0(x) - (1-\nu)N_1(x).$$

В уравнении (12) ν — коэффициент Пуассона; $J_0(x)$, $J_1(x)$ — функции Бесселя первого рода; $N_0(x)$, $N_1(x)$ — функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядков.

Частотное уравнение (12) для тонких пьезоэлектрических элементов зависит только от упругих податливостей s_{11}, s_{12}, s_{13} и относительной толщины ε через α_4.

Первый (основной) резонанс $f_{0,}$ рассчитанный из частотного уравнения (12), называют частотой резонанса по окружности, остальные два — частоты резонанса по толщине стенки кольца.

Для расчета резонансных частот использовались: метод однородных решений, программа *ANSYS*, приближенный расчет по формуле (12) с учетом толщинных поправок и расчет без учета толщинных поправок ($\varepsilon = 0$) для рассматриваемого кольца (a = 15 мм, b = 3 мм). Результаты представлены в табл. 2

Таблица 2

Table 2

Пример расчета резонансных частот

Calculation example of resonance frequencies

	Точное решение (1–3)	*ANSYS*	Приближенное решение (12)	Решение (12) при $\varepsilon = 0$
f_0, КГц	66719	66719	66720	66736
f_1, КГц	174426	174460	174388	174690
f_2, КГц	303376	303480	303319	304930

Для определения величин пьзомодуля d_{31} или коэффициента связи k_p^2 необходимо воспользоваться другим типом однородных электрических условий — равенством нулю тока на электродах. Этот тип граничных условий соответствует условиям антирезонанса. Ограничиваясь приближением нулевого порядка в (10, 11), получим из [11] условие для первого низкочастотного антирезонанса:

$$1 - k_p^2 + k_p^2(1+\nu)\,[\boldsymbol{\Delta}_1/\boldsymbol{\Delta}\,(J_1(x_1) - b/a\, J_I(x_2)) + \boldsymbol{\Delta}_2/\boldsymbol{\Delta}\,(N_1(x_1) - $$
$$- b/a\, N_1(x_2))]/(1 - b^2/a^2) = 0.$$

Здесь

$$x_1 = \alpha_0/\varepsilon;\ x_2 = x_1\, b/a;\ \boldsymbol{\Delta} = F_1(x_1)\, F_2(x_2) - F_2(x_1)\, F_1(x_2); \quad (13)$$
$$\boldsymbol{\Delta}_1 = F_2(x_2) - b/a\, F_2(x_1);\ \boldsymbol{\Delta}_2 = b/a\, F_1(x_1) - F_1(x_2).$$

При $b \to 0$ уравнение (13) вырождается в уравнение антирезонансных частот диска нулевой толщины [3].

Для определения упругого модуля c_{33}^D и коэффициента связи k_t^2 измерим два толщинных резонанса. Имея два уравнения (9) с двумя неизвестными численными методами [12] можно определить c_{33}^D и k_t^2. Далее легко рассчитать пьезомодуль d_{33}, используя соотношения:

$$k_t^2/(1-k_t^2) = (e_{33}/c_{33})^2\, c_{33}^D/\,(\varepsilon_{33}^T(1-k_p^2));\ d_{33} = e_{33}/c_{33} - 2d_{31}\, e_{33}/c_{33}.$$

2. Методика определения сдвиговых констант для кольца с электродами на боковых поверхностях. Исследуем теперь возбуждение в рассматриваемом кольце сдвиговой моды колебаний. Для этого при неизменной поляризации ПКМ необходимо поместить новые электроды на внутреннюю и внешнюю цилиндрические поверхности кольца, а старые электроды на торцах удалить. Решим данную задачу методом однородных решений. Метод однородных решений для антисимметричных колебаний пьезоэлектрического слоя подробно описан в [12].

Удовлетворяя однородным граничным условиям на торцах при

$$z = \pm h\ T_{zz} = 0;\ T_{rz} = 0;\ D_z = 0, \quad (14)$$

получаем известное дисперсионное уравнение антисимметричных колебаний

$$a_n\, M_n\, th\,(\beta_n) = 0\ (n = 1, 2, 3), \quad (15)$$

где $M_1 = b_2\, d_3\, k_{33} - b_3\, d_2\, k_{32}$; $M_2 = b_3\, d_I\, k_{31} - b_1\, d_3\, k_{33}$; $M_3 = b_1\, d_2\, k_{32} - b_2\, d_3\, k_{31}$; $d_n = -\alpha^2\, e_{13}\, k_{1n} + e_{33}\, k_{2n} + \varepsilon_{33}\, k_{3n}$; параметры $a_{n,}$ β_n,b_n, k_{mn} определены в (7).

Корни дисперсионного уравнения (15) и определяют систему однородных решений антисимметричных колебаний.

Построим их асимптотику в окрестности $\alpha = 0$. В уравнениях (7, 15) положим $\alpha = 0$, $\Omega \neq 0$, которые являются началом дисперсионных кривых. При этих условиях система уравнений (1, 2) вырождается, и ее решение представляет толщинные колебания рассматриваемого кольца, а удовлетворение однородным граничным условиям (14) приводит к определению собственных частот — толщинных резонансов. В итоге получим два множества значений для Ω:

$$1 - k_{15}^2 + k_{15}^2 \operatorname{tg}(\Omega_n)/\Omega_n = 0 \quad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (16)$$

$$\Omega_m = m\,\pi\,(c_{33}^D / c_{44})^{0,5} \quad m = 1, 2, 3, \ldots \qquad (17)$$

Здесь введен коэффициент связи сдвиговых колебаний $k_{15}^2 = 1 - c_{44}/c_{44}^D$.

Для керамики $PZT4$ рассчитаны первые две толщинные частоты из уравнения (16):

$$f_{t\,1} = 1{,}180198 \text{ МГц}; f_{t\,2} = 2{,}882160 \text{ МГц}.$$

Первый корень второго множества Ω_m из (17) равен 7,8294, что соответствует частоте 4,533954 МГц.

Следует отметить одинаковые форму и вид дисперсионных кривых уравнения (15) рассматриваемой задачи для кольца из ПКМ с электродами на боковых поверхностях и антисимметричных колебаний пьезоэлектрической плиты с электродами на торцах [12]. Они отличаются только множеством (16) или началом дисперсионных кривых.

Решение данной краевой антисимметричной задачи (1–3) состоит из суммы двух решений, удовлетворяющих нулевым граничным условиям (14) при $z = \pm h$:

— однородного решения [12];

— частного решения.

Однородные решения в явном виде не входят в расчет проводимости из-за третьего соотношения системы (1). Частное решение не составляет труда построить. Пусть компоненты вектора электрической индукции частного решения равны $D_z^0 = 0$ и $D_r^0 = A\varepsilon_{11}/r$, где величина A не зависит от координаты r и определяется из электрических граничных условий при $r = a, b$. Данный выбор компонента вектора электрической индукции позволяет автоматически удовлетворить третьему уравнению системы (1). Далее потребуем, чтобы механические смещения соответственно были равны $W = 0$ и $U = Bh\sin(\Omega\varsigma)/r$. Тогда механические составляющие частного решения для антисимметричных колебаний имеют вид:

$$T_{rz}^0 = A\, e_{15}/(r \ln(a/b))\,(1 - \cos(\Omega\varsigma)/\cos(\Omega));$$

$$T_{rr}^0 = Ah\,(c_{11} - c_{12})\, e_{15} \sin(\Omega\varsigma)/(r^2 \ln(a/b)\, c_{44}\, \Omega \cos(\Omega)); \; T_{zz}^0 = 0;$$

$$U^0 = -h\, A\, e_{15} \sin(\Omega\varsigma))/(r \ln(a/b)\, c_{44}\, \Omega \cos(\Omega)).$$

Используя закон Ома $I = 2V \times Y$, формулу $D_r = (e_{15}\, U,_z - \varepsilon_{11}\, \varphi,_r)$ и проинтегрировав по dS (где S — площадь электродов на боковой поверхности кольца), получим проводимость Y^0 рассматриваемого кольца частного решения:

$$Y^0 = -i\omega\, C_k\,(1 - k_{15}^2 + k_{15}^2 \operatorname{tg}(\Omega)/\Omega), \qquad (18)$$

где величина C_k для низших частот равна $2h\,\varepsilon_{11}^T/\ln(a/b)$.

Из выражения (18) при низких частотах $\Omega \rightarrow 0$ получим известную формулу для проводимости $Y = -i\omega C_k$, из которой легко рассчитать ε_{11}^T.

Проводимость $Y^0 \rightarrow max$ при $\Omega = \pi/2$, что соответствует резонансной частоте $f_Y = 923760$ Гц для $PZT4$. Антирезонанс из (18) получим при $Y^0 = 0$, что соответствует $f_A = 1{,}185$ МГц для $PZT4$.

Результаты расчета критических частот с помощью программы *ANSYS* следующие: $f_Y = 939$ КГц, $f_A = 1{,}19$ МГц.

Результаты исследования. В ходе экспериментов для реализации нового метода использована программа *ANSYS*. Численные расчеты представляют собой виртуальный эксперимент, по информативности намного превышающий возможности реального эксперимента.

Алгоритм решения обратной задачи следующий:

1. Для кольца с электродами на торцах из рассчитанных с помощью *ANSYS* первых трех резонансных частот (см. табл. 2) были численно найдены при помощи процедуры оптимизации Левенберга — Марквардта [13] или с помощью метода наименьших квадратов упругие модули гибкости:

$$s_{11} = 0{,}1229 \times 1e - 10;$$

$$s_{12} = -0{,}04049 \times 1e - 10;$$

$$s_{13} = -0{,}052844 \times 1e - 10.$$

Ошибка для модулей гибкости не превышает 1 %. Используя рассчитанные с помощью *ANSYS* первые два толщинных резонанса $f_1 = 2{,}02$ МГц и $f_2 = 6{,}728$ МГц, получим упругую константу $c_{33}^D = 15{,}427 \times 1e10$ и пьзомодуль $d_{33} = 2{,}8584 \times 1e - 10$. Ошибка не превышает 1 %.

Пьезомодуль d_{31} определим по известной методике [1] из первого антирезонанса. Модуль равен $-1{,}23 \times 1e - 10$ для частоты 73959 Гц.

2. Для кольца с электродами на боковых поверхностях для рассчитанных частот с помощью *ANSYS* $f_A = 1190$ КГц и $f_Y = 939$ КГц по формулам (16), (18) можно рассчитать c_{44} и k_{15}^2. Пьезомодуль d_{15} легко рассчитать, используя формулу: $k_{15}^2 = c_{44}\, d_{15}^2 / \varepsilon_{11}^T$.

3. Диэлектрические проницаемости ε_{33}^T и ε_{11}^T рассчитываем из измерений емкостей на частоте 1 КГц согласно [1] для колец с электродами на торцах и на боковых поверхностях соответственно.

Приведем все модули для *PZT*4, определенные новым методом на одном образце с помощью *ANSYS*:

$$s_{11} = 0{,}123\ (0{,}123);$$
$$s_{12} = -0{,}0405\ (-0{,}0405);$$
$$s_{13} = -0{,}0528\ (-0{,}0531);$$
$$s_{33} = 0{,}153\ (0{,}155);$$
$$s_{44} = 0{,}38\ (0{,}39);$$
$$d_{31} = -1{,}23\ (-1{,}23);$$
$$d_{33} = 2{,}8584\ (2{,}89);$$
$$d_{15} = 4{,}82\ (4{,}96);$$
$$\varepsilon_{33}^T = 114.95\ (115{,}05);$$
$$\varepsilon_{11}^T = 130\ (130{,}54).$$

Здесь в скобках указаны табличные справочные данные. Порядковый коэффициент для модулей соответственно $1e10$ или $1e-10$ опущен.

В заключение отметим: ГОСТ, ОСТ, американский стандарт и все другие известные автору работы определения параметров поляризованной пьезокерамики методом резонанса — антирезонанса базируются на независимости констант от частоты. Насколько это соответствует реальности, предполагается обсудить в следующих статьях.

Обсуждение и заключения. В работе приведены результаты исследований нового обоснованного метода и алгоритма определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамики на одном образце в виде кольца с различными электродами. Сначала измеряют с электродами на торцах, а затем на том же кольце, но с новыми электродами на боковых цилиндрических поверхностях (старые электроды на торцах удаляются). Главное достоинство данного метода — для определения полного набора модулей пьезокерамики используется только один образец. В других методах измеренные модули пьезокерамики не являются совместимыми в силу того, что частоты резонансов и антирезонансов измеряются на трех различных по геометрии и степени поляризации образцах. Кроме того, в новом методе исключены измерения высокочастотных антирезонансов с электродами на торцах исследуемого элемента: технически трудно решить, какой минимум соответствует какому максимуму для высокочастотных колебаний.

Библиографический список

1. Материалы пьезокерамические. Технические условия. ОСТ 11.0444-87 / Центральный государственный фонд стандартов и технических условий. — Москва : Электростандарт, 1987. — 141 с.

2. IRE standards on piezoelectric crystals, measurements of piezoelectric ceramics / IRE. — Proceedings of the IRE. — 1961. — Vol. 49, is. 7. — P. 1162.

3. Мадорский, В. В. Исследование методик определения констант поляризованной пьезокерамики / В. В. Мадорский, В. Н. Митько // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 36–45.

4. Definition of constants for piezoceramic materials / V. A. Akopyan [et al.]. — New York : Nova Science Publisher, 2010. — 205 p.

5. Tickoo, S. ANSYS Workbench 14.0. A Tutorial Approach / S. Tickoo. — Schererville : CADCIM Technologies, 2012.— 416 p.

6. Tiersten, H.-F. Linear piezoelectric plate vibration / H.-F.-Tiersten. — New York : Plenum press, 1969. — 211 p.

7. Мадорский, В. В. Симметричные колебания пьезоэлектрических пластин / В. В. Мадорский, Ю. А. Устинов // Изв. АН Арм. ССР. — 1976. — Т. 29, № 5. — С. 51–58.

8. Analysis of 1-3 piezocomposite and homogeneous piezoelectric rings for power ultrasonic transducers / M.A.B. Andrade [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. — 2009. — Vol. 31, № 4. — P. 312–318.

9. Митько, В. Н. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении / В. Н. Митько, Ю. А. Крамаров, А. А. Панич. — Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. — 240 с.

10. Shaw, E. A. G. On the resonant vibrations of thick barium titanate disks / E. A. G. Shaw // Journal of the Acoustical Society of America. — 1956. — Vol. 20, № 1. — P. 38–50.

11. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. И. Мусиенко, Е. В. Шарапова. — Москва : Техносфера, 2006. — 632 с.

12. Мадорский, В. В. Построение системы однородных решений и анализ корней дисперсионного уравнения антисимметричных колебаний пьезоэлектрической плиты / В. В. Мадорский, Ю. А. Устинов // Прикладная механика и техническая физика. — 1976. — № 6. — С. 138–145.

13. Васильев, А. Н. MATLAB. Практический подход / А. Н. Васильев. — Москва : Наука и техника, 2015. — 448 с.

References

1. Materialy p'yezokeramicheskie. Tekhnicheskie usloviya. OST 11.0444-87. [Piezoceramic materials. Performance specifications. OST 11.0444-87.] Central State Foundation of Standards and Technical Regulations. Moscow: Elektrostandart, 1987, 141 p. (in Russian).

2. IRE standards on piezoelectric crystals, measurements of piezoelectric ceramics. IRE. Proceedings of the IRE, 1961, vol. 49, iss. 7, pp. 1162.

3. Madorsky, V.V., Mitko, V.N. Issledovanie metodik opredeleniya konstant polyarizovannoy p'yezokeramiki. [Investigating constant determination techniques of polarized piezoceramics.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2 (77), pp. 36–45 (in Russian).

4. Akopyan, V.A., et al. Definition of constants for piezoceramic materials. New York: Nova Science Publisher, 2010, 205 p.

5. Tickoo, S. ANSYS Workbench 14.0. A Tutorial Approach. Schererville: CADCIM Technologies, 2012, 416 p.

6. Tiersten, H.-F. Linear piezoelectric plate vibration. New York: Plenum press, 1969, 211 p.

7. Madorsky, V.V., Ustinov, Y.A. Simmetrichnye kolebaniya p'yezoelektricheskikh plastin. [Symmetrical oscillations of piezoelectric plates.] Proceedings of the NAS RA, 1976, vol. 29, no. 5, pp. 51–58 (in Russian).

8. Andrade, M.-A.-B., et al. Analysis of 1-3 piezocomposite and homogeneous piezoelectric rings for power ultrasonic transducers. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 312–318.

9. Mitko, V.N., Kramarov, Y.A., Panich, A.A. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v p'yezoelektricheskom priborostroenii. [Mathematical modeling of physical processes in piezoelectric instrument making.] Rostov-on-Don: SFU Publ. House, 2009, 240 p. (in Russian).

10. Shaw, E. A. G. On the resonant vibrations of thick barium titanate disks. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, vol. 20, no. 1, pp. 38–50.

11. Sharapov, V.M., Musienko, M.I., Sharapova, V.E. P'yezoelektricheskie datchiki. [Piezoelectric detectors.] Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p. (in Russian).

12. Madorsky, V.V., Ustinov, Y.A. Postroenie sistemy odnorodnykh resheniy i analiz korney dispersionnogo uravneniya antisimmetrichnykh kolebaniy p'yezoelektricheskoy plity. [Construction of a system of homogeneous solutions and analysis of the roots of the dispersion equation of antisymmetric vibrations of a piezoelectric plate.] Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1976, no. 6, pp. 138–145 (in Russian).

13. Vasilyev, A.N. MATLAB. Prakticheskiy podkhod. [MATLAB. Practical approach.] Moscow: Nauka i tekhnika, 2015, 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.07.2017
Сдана в редакцию 12.07.2017
Запланирована в номер 10.10.2017

Received 11.07.2017
Submitted 12.07.2017
Scheduled in the issue 10.10.2017

Об авторе:

Мадорский Виктор Вениаминович,
доцент кафедры «Электротехника и электроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0320-5074
epohrbats@Gmail.com

Author:

Madorsky, Victor V.,
associate professor of the Electrical Engineering and Electronics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0320-5074
epohrbats@Gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 658.516.3:621 10.23947/1992-5980-2017-17-4-22-33

Влияние биений шпиндельной группы на притягивающие множества деформационных смещений инструмента при точении*

В. Л. Заковоротный[1], В. Е. Гвинджилия[2]**

[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of spindle group wavering on attracting sets of deformation tool displacements under turning***

V. L. Zakovorotny[1], V. E. Gvindzhiliya[2]**

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Проблемы динамики процесса резания, рассматриваемые в единстве устойчивости равновесия в подвижной системе координат, определяемой траекториями исполнительных элементов станка, а также свойств притягивающих множеств, формируемых в окрестности точки равновесия, являлись предметом многочисленных исследований. В отличие от этих работ, в данной статье обсуждается проблема формирования притягивающих множеств, формируемых в динамической системе резания, в которой траектории движения исполнительных элементов станка являются возмущенными периодическими колебательными смещениями шпиндельной группы. Эти возмущения во многом определяются биениями шпиндельной группы. Они вызывают периодические колебательные смещения инструмента относительно обрабатываемой детали и в совокупности с динамическими свойствами системы приводят к различным динамическим эффектам. Во-первых, за счет параметрического самовозбуждения возможна потеря устойчивости установившихся стационарных траекторий периодических деформационных смещений. Во-вторых, в зависимости от частоты и амплитуды пространственных биений шпиндельной группы, возможны формирования притягивающих множеств типа предельных циклов и инвариантных торов и их вырождение. Наконец, при вариациях частоты имеют место бифуркации удвоения периода колебаний и, как следствие, образование хаотических аттракторов. Причем их формирование является чрезвычайно чувствительным, как к параметрам взаимодействующих через процесс резания подсистем со стороны инструмента и обрабатываемой детали, так к параметрам динамической связи формируемой процессом резания.

Материалы и методы. Свойства притягивающих множеств и законы их формирования изучаются на основе цифрового моделирования. Для этого приводится математическая модель возмущенной системы, а также результаты изучения формирования притягивающих множеств в динамической системе резания на примере процесса точения.

Результаты исследования. Приводятся примеры влияния биений на притягивающие множества системы, в том числе рассматриваются бифуркации системы в зависимости от параметров возмущений.

Introduction. In a large body of research, problems of the cutting process dynamics are considered in the uniformity of the static stability in the moving coordinate system defined by the trajectories of the machine executive elements, and also of the attracting sets properties generated in the vicinity of the balance point. In contrast to these investigations, the given paper discusses the problem of forming attracting sets that are generated in the dynamic cutting system in which the movement trajectories of the machine executive elements are perturbed periodic vibration displacements of the spindle group. These perturbations are largely determined by the spindle group wavering. The latter causes periodic oscillation displacements of the tool relating to the work-in-process, and, combined with the dynamic system properties, leads to different dynamic effects. First, due to the parametric self-excitation, the instability of the steady-state stationary trajectories of the periodic deformation displacements may occur. Secondly, depending on the frequency and amplitude of the spindle group spatial beats, the formation of attracting sets of the limit cycle type and invariant tori, as well as their degeneration may happen. Finally, with the variations of frequency, the oscillation flip bifurcations, and, consequently, the formation of chaotic attractors occur. Moreover, their generation is extremely sensitive both to the parameters interacted through the cutting process of subsystems on the side of the tool and the work-in-process, and to the parameters of the dynamic link generated by the cutting process.

Materials and Methods. The properties of the attracting sets and the laws of their formation are studied on the digital simulation basis. For this, a mathematical model of the perturbed system is given, as well as the results of studying the formation of attracting sets in a dynamic cutting system using the example of the turning process.

Research Results. The examples of beats effect on the system attracting sets are provided including the system bifurcations depending on the parameters perturbations.

* Работа выполнена в рамках Госзадания 9.77-22.2017/БЧ: «Разработка теории синергетического управления процессом резания с учетом влияния термодинамики».

** E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, sinedden@yandex.ru

*** The research is done within the frame of Government task no. 9.77-22.2017/БЧ :“Development of theory of synergetic control of the cutting process due to thermodynamics effect”.

Ключевые слова: динамика процесса точения, биения, флуктуации параметров, притягивающие множества, бифуркации.

Keywords: turning process dynamics, beats, parameter fluctua tions, attracting sets, bifurcations.

Образец для цитирования:. Заковоротный, В. Л. Влияние биений шпиндельной группы на притягивающие множества деформационных смещений инструмента при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 4. — С. 22–33.

For citation: V.L. Zakovorotny, V.E. Gvindzhiliya. Effect of spindle group wavering on attracting sets of deformation tool displacements under turning. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp.22–33.

Постановка проблемы. Синергетический подход к анализу и синтезу управляемого процесса обработки на станках полагает рассмотрение двух взаимодействующих через зону резания подсистем со стороны инструмента и обрабатываемой детали [1–5]. В отличие от традиционных методов, управление в этом случае формируется на основе согласования внешнего управления (программы ЧПУ) с динамическими свойствами процесса обработки [2–5]. Необходимо учитывать не только устойчивость траекторий [6–8, 12, 13, 15], но и формируемые притягивающие множества (предельные циклы, инвариантные торы, хаотические аттракторы и пр. [9–11, 14]). При построении математической модели динамической связи между подсистемами раскрывается зависимость сил резания от траекторий исполнительных элементов станка и упругих деформаций вершины инструмента относительно детали несущей системы станка [6–17]. В этом случае учитываются экспериментально наблюдаемые эффекты зависимости сил резания от скорости, их запаздывание по отношению к изменениям смещения инструмента относительно детали, наличие следа на детали от траектории на предыдущем обороте и пр. [16, 17]. Ранее авторами были рассмотрены проблемы влияния флуктуаций движения исполнительных элементов станка на траектории формообразующих движений вершины инструмента относительно детали [18–20] и на их устойчивость [21]. Настоящая статья является развитием основных положений ранее опубликованных работ [18–21]. Анализируются закономерности изменения свойств притягивающих множеств в динамической системе резания, которые вызваны флуктуациями параметров динамической связи, обусловленные биениями шпиндельной группы. Например, если без биений шпинделя в системе формируется притягивающее множество типа предельного цикла, то периодические смещения инструмента относительно детали, вызванные биениями шпиндельной группы, приводят к взаимодействию изменения параметров системы с предельным циклом. При этом в зависимости от траектории деформационных смещений, вызванных биениями, могут наблюдаться различные бифуркации притягивающих множеств (предельных циклов, двумерных торов, хаотических аттракторов). Необходимо учитывать, что именно тип и параметры притягивающих множеств непосредственно влияют на топологию формируемой резанием поверхности и ограничивают возможности синергетического управления процессами обработки на металлорежущих станках.

Математическая модель. Флуктуации параметров, рассматриваемые в статье, обусловлены биениями шпиндельной группы станка, зависящие от биений шпинделя, геометрических погрешностей изготовления и установки зажимного приспособления, несовпадения оси вращения шпинделя и оси задней бабки и др. (рис. 1). Они являются периодическими функциям времени $\Delta X_i(t) = \Delta X_i(t - kT_0), \quad k = 1,2,3..., i = 1,2,3$. Смещениям $\Delta X_i(t)$ соответствуют скорости $\Delta V_i(t) = d\Delta X_i(t)/dt$. Притягивающие множества, формируемые при резании в возмущенной системе, образуются на основе взаимодействия флуктуаций динамической системы со свойствами невозмущенной системы. Для раскрытия закономерностей влияния $\Delta X_i(t)$, $\Delta V_i(t)$ на притягивающие множества ограничимся случаем обработки абсолютно жесткой детали. Тогда упругая система определяется только подсистемой инструмента, в которой деформации отсчитываются от баз станка, привязанных к его несущей системе (рис. 1). Для описания наиболее важных свойств подсистемы инструмента она схематизируется в виде элемента с обобщенной массой, подвешенного в пространстве на упруго-диссипативных подвесках [9–11]. Биения заготовки приводятся к вариациям точки контакта вершины инструмента без учета упругих деформаций детали.

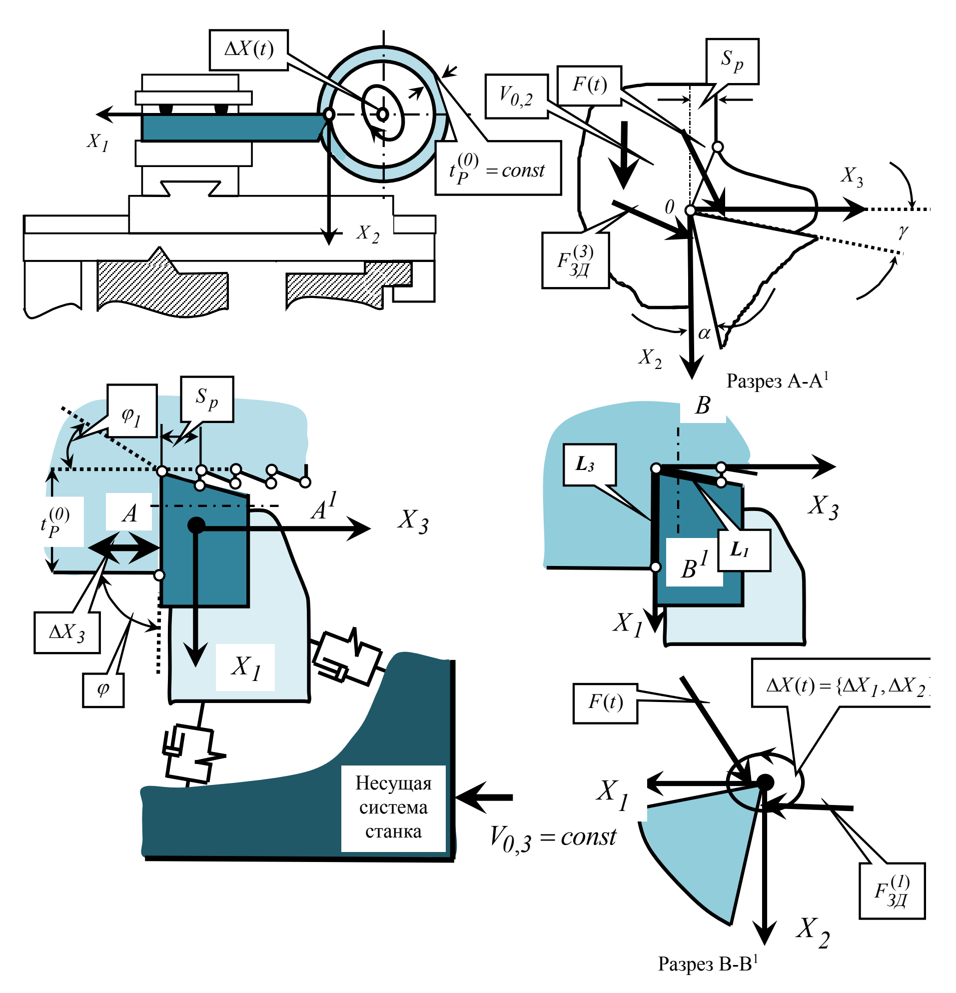


Рис. 1. Ориентация осей деформационных смещений, возмущений и сил, действующих на режущий инструмент

Fig. 1. Orientation of deformation displacements axes, perturbations and forces acting on the cutting tool

Динамику такой системы можно описать уравнением, обоснование которого дано в работах [23–25]:

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F \qquad (1)$$

где $X=\{X_1,X_2,X_3\}^T$ — вектор упругих деформационных смещений вершины инструмента в $[мм]$; $m=\left[m_{s,k}\right],\ m_{s,k}=m,\ при: s=k,\ m_{s,k}=0,\ при: s\neq k,\quad s,k=1,2,3$ в $кгс^2/мм$, $h=\left[h_{s,k}\right], s,k=1,2,3$ в *кгс/мм*, $c=\left[c_{s,k}\right], s,k=1,2,3$ в $кг/мм$ — симметричные и положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов подсистемы инструмента; $F=\{[F_1+F^{(1)}_{ЗД,0}],F_2,[F_3+F^{(1)}_{ЗД,0}]\}^T$ — силы резания в координатах состояния и внешних воздействиях. Здесь силы $F^{(1)}_{ЗД,0}$, $F^{(3)}_{ЗД,0}$, действующие на задние грани, зависят от скоростей их сближения с обработанной частью детали и длины контакта (L_1 и L_3 на рис. 1) рассматриваемой грани с поверхностью заготовки. То есть они представимы в виде

$$\begin{cases} F^{(1)}_{ЗД,0}=\rho_1\{\int\limits_{t-T}^{t}[V_{0,3}-dX_3/dt]dt-\Delta X_3(t)\}\exp(\Delta V_1(t)-\alpha_1 dX_1/dt); \\ F^{(3)}_{ЗД,0}=\rho_3[t_P^{(0)}+\Delta X_1(t)-X_1(t)]\exp[V_{0,3}-\alpha_3 dX_3/dt+\Delta V_3(t)], \end{cases} \qquad (2)$$

где ρ_1, ρ_3 — удельные значения сил, приведенные к длине контакта задних граней инструмента с поверхностью обработанной части детали в $[кг/мм]$; α_1, α_3 — коэффициенты крутизны нарастания сил по мере сближения поверхностей инструмента и детали.

$$\begin{cases} T_1 dF_1 \; / \; dt + F_1 \; = \rho_0 \chi_1 \{1 + \mu \exp[-\alpha(V_{0,2} + \Delta V_2(t) - dX_2 \; / \; dt)]\} [t_P^{(0)} + \\ + \Delta X_1(t) - X_1(t)] \int\limits_{t-T}^{t} \{V_{0,3} - dX_3 \; / \; dt + \Delta V_3(t)\} dt; \\ T_2 dF_2 \; / \; dt + F_2 \; = \rho_0 \chi_2 \{1 + \mu \exp[-\alpha(V_{0,2} + \Delta V_2(t) - dX_2 \; / \; dt)]\} [t_P^{(0)} + \\ + \Delta X_1(t) - X_1(t)] \int\limits_{t-T}^{t} \{V_{0,3} - dX_3 \; / \; dt\} dt; \\ T_3 dF_3 \; / \; dt + F_3 \; = \rho_0 \chi_3 \{1 + \mu \exp[-\alpha(V_{0,2} + \Delta V_2(t) - dX_2 \; / \; dt)]\} [t_P^{(0)} + \\ + \Delta X_1(t) - X_1(t)] \int\limits_{t-T}^{t} \{V_{0,3} - dX_3 \; / \; dt\} dt, \end{cases} \quad (3)$$

Здесь F_i *при* $i = 1,2,3$ — силы, действующие на переднюю грань инструмента, с учетом запаздывания, определяемого постоянными времени $T_i, i = 1,2,3$; ρ_0 — давление стружки на переднюю поверхность инструмента в области малых скоростей резания; μ — коэффициент, определяющий соотношение сил резания в областях малых и больших скоростей; α — коэффициент, определяющий убывание сил по мере увеличения скорости резания; $V_{0,2}$, $V_{0,3}$ — определяемые технологическими режимами значения скоростей резания и продольной подачи; T — время оборота детали. Так как $T_1 \neq T_2 \neq T_3$, то в переходных процессах учитывается изменение ориентации сил в пространстве. В установившемся состоянии без возмущений ориентация сил неизменна и определяется коэффициентами $\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$. Модель (1), (2), (3), как и ранее [13], учитывает: уменьшение по экспоненциальному закону сил при увеличении скорости, запаздывание вариаций сил по отношению к деформационным смещениям, закономерности формирования новой площади срезаемого слоя.

Эта модель отличается тем, что учитывает изменение ориентации сил в нестационарном режиме, формирование дополнительных сил за счет сближения задних граней инструмента с обрабатываемой деталью $F_{ЗД,0}^{(1)}$, $F_{ЗД,0}^{(3)}$. Эти силы зависят не только от свойств сближения задних граней с поверхностями заготовки, но и от изменяющейся в динамике длины контакта инструмента с заготовкой. Это существенное обобщение и уточнение известных положений о неоднозначности изменения сил, действующих на инструмент, при его сближении с заготовкой и отталкивании [22]. Эти свойства характеризуют нелинейную диссипацию процесса резания. В ней приняты также во внимание возмущения $\Delta X_i(t)$, $\Delta V_i(t)$, как заданные периодические функции $\Delta X(t) = \Delta X(t - kT_0)$, $\Delta V(t) = \Delta V(t - kT_0)$.

Бифуркации притягивающих множеств. Изучение бифуркаций притягивающих множеств выполнено на основе цифрового моделирования системы (1–3) в зависимости от параметров биений. Биения представляются в виде $\Delta X(t) = \Delta X_0 \{\sin \Omega t, \sin(\Omega t + \pi / 2)\}^T$, то есть рассматриваются в плоскости, нормальной к оси вращения детали. Траектории биений представляют окружности. Преобразование притягивающих множеств выполнено по следующей схеме. Рассматривался процесс врезания инструмента и образования стационарных состояний без биений шпинделя. Затем изучались переходные процессы и установление нового стационарного состояния при введении в систему биений. Диаграмма бифуркаций притягивающих множеств выполнена по сетке, при этом было вычислено более 10 000 сочетаний исходных состояний системы, параметров биений и динамической связи, формируемой процессом резания. Проанализирована система, параметры которой приведены в табл. 1, а модели сил в координатах состояния в табл. 2. Обобщенная масса — $m = 0,035 \; кг / с^2$. Для удобства принято $T_1 = T_3 = 0,5T_2 = T_P$. Для этого случая ранее проанализированы механизмы потери устойчивости траекторий [21]. Примеры вычислены для режимов: продольная подача $S_P = (0,05 - 0,3) \; мм$, глубина $t_P = (0,5 - 2,5) мм$, скорость $V_{2,0} = (500 - 2000) \; мм / с$. Связь параметров модели с технологическими режимами изложена в более ранних публикациях [2, 12–14, 16, 17]. Если свойства системы без биений заданы, то их преобразования, вызванные биениями, зависят от амплитуды ΔX_0 и частоты Ω. Здесь наибольший интерес представляет ситуация, когда без биений в системе формируется орбитально асимптотически устойчивый предельный цикл, то есть автоколебания.

Таблица 1
Table 1

Параметры динамической системы

Dynamic system parameters

$h_{1,1}$, $кг \cdot с / мм$	$h_{2,2}$, $кг \cdot с / мм$	$h_{3,3}$, $кг \cdot с / мм$	$h_{1,2} = h_{2,1}$, $кг \cdot с / мм$	$h_{1,3} = h_{3,1}$, $кг \cdot с / мм$	$h_{2,3} = h_{3,2}$, $кг \cdot с / мм$
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08
$c_{1,1}$, $кг / мм$	$c_{2,2}$, $кг / мм$	$c_{3,3}$, $кг / мм$	$c_{1,2} = c_{2,1}$, $кг / мм$	$c_{1,3} = c_{3,1}$, $кг / мм$	$c_{2,3} = c_{3,2}$, $кг / мм$
1000	800	800	200	100	100

Таблица 2
Table 2

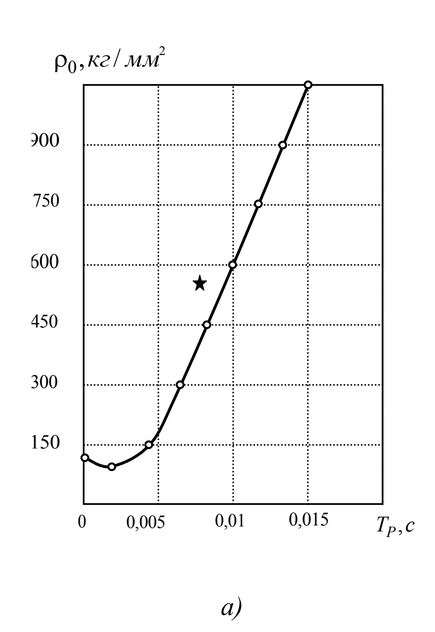
Параметры модели сил в координатах состояния

Parameters of force model in state coordinates

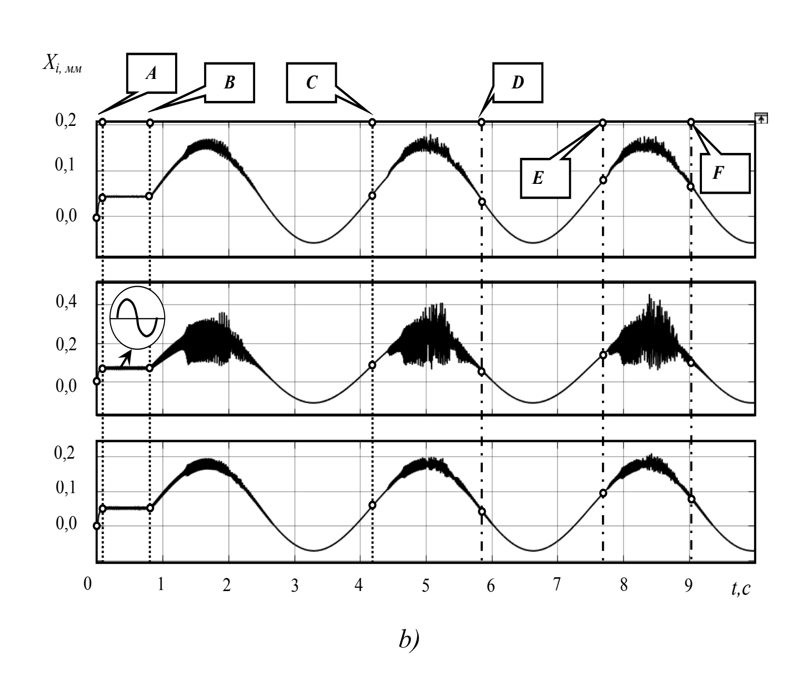
$\rho_0, кг / мм^2$	$\alpha, с / мм$	$\alpha_1, с / мм$	$\alpha_2, с / мм$	$T, с$	$\rho_1, кг / мм$	$\rho_3, кг / мм$
(50 – 900)	(0,01 – 0,1)	(0,2 – 0,5)	(0,2 – 0,5)	(0,01 – 0,1)	0,2	0,2

Частотный диапазон биений можно разделить на три поддиапазона. Низкочастотный диапазон (в пределах 0,1–10,0 Гц), в котором вдоль периодической траектории параметры системы можно считать медленно изменяющимися, а систему анализировать как замороженную. Среднечастотный — в пределах 10,0–400,0 Гц, в котором происходит сложное взаимодействие автоколебаний с колебаниями, обусловленными параметрическими возбуждениями. Высокочастотный — выше 400,0 Гц, в котором частоты биения находятся за пределами полосы пропускания колебательных контуров. Однако и в этом случае биения влияют на динамическое качество за счет эффектов вибрационного сглаживания нелинейных связей, формируемых резанием.

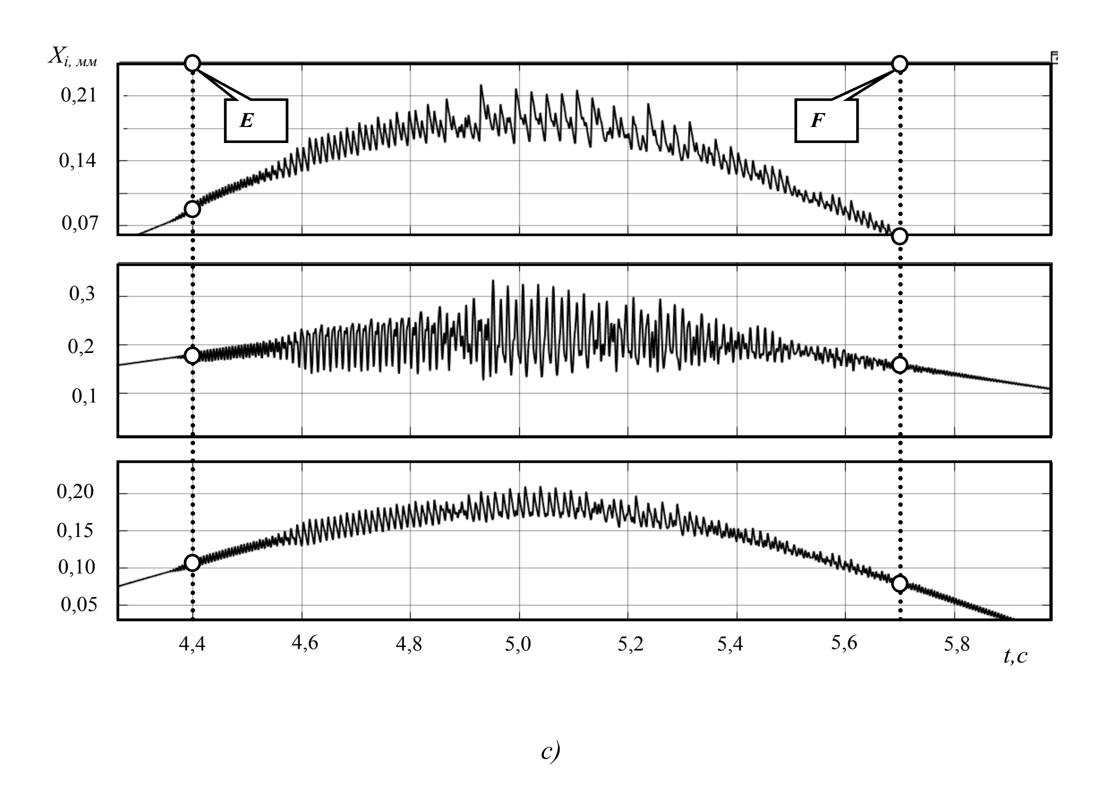
Вначале рассмотрим низкочастотный поддиапазон. На рис. 2 приведен пример динамической перестройки системы при ее возмущении гармоническими биениями шпинделя. На рис. 2а звездочкой отмечена точка, для которой приведены примеры траекторий.



a)



b)



c)

Рис. 2. Пример динамической перестройки системы при движении вдольвозмущенной траектории с частотой 0,3 Гц: *a* — область устойчивости невозмущенной системы в плоскости « $\rho_0 - T_P$ »; *b* — установление стационарного периодического режима; *c* — увеличенный фрагмент динамической реорганизации деформационных смещений на участке «E–F»

Fig. 2. Example of system dynamic adjustment when moving along perturbed trajectory with frequency of 0.3 Hz: a – stability region of unperturbed system in “ $\rho_0 - T_P$ ”plane; b – setting of stationary periodic mode; c – increased fragment of dynamic rearrangement of deformation displacements in “E-F” section

На траекториях выделены участки: «0-А» — переходной процесс врезания инструмента в деталь; «А-В» — стационарный режим без биений; «В-С» — переходной процесс установления стационарного периодического режима с биениями. В выделенной точке равновесие является неустойчивым, в системе формируется притягивающее множество типа предельного цикла (на иллюстрации выделено в окружности). Частота автоколебаний в этом случае без биений равна 175 Гц. При возмущении системы с частотой биений 0,3 Гц вдоль траектории изменяются параметры системы, так как меняется текущее значение припуска и скорости деформационных смещений в плоскости. Однако это медленные изменения, которые вызывают изменения уравнений в вариациях относительно рассматриваемой точки. Наблюдается эволюционная перестройка притягивающих множеств (на участке «C-D») и свойство устойчивости (на участке «D-E» траектория является асимптотически устойчивой).

По мере увеличения частоты биений в пределах от 10,0 Гц до 400,0 Гц в системе, в зависимости от частоты и амплитуды, наблюдаются следующие эффекты нелинейных взаимодействий (рис. 3). При малой амплитуде биений в установившемся состоянии наблюдается формирование двумерного инвариантного тора. При дальнейшем увеличении амплитуды имеет место преобразование тора в предельный цикл на частоте возмущений. При этом имеет место эффект смещения упругих деформационных смещений инструмента, усредненных по периоду колебаний, зависящего от амплитуды и частоты биений шпинделя (рис. 4). Он связан с тем, что нелинейные связи процесса резания не обладают свойством центральной симметрии относительно биений. Это, прежде всего, связи, формируемые контактом задних граней инструмента с обработанной частью детали. Таким образом, текущее значение диаметра обрабатываемой детали зависит не только от сил резания и параметров упругости взаимодействующих подсистем, но и от параметров установившихся периодических движений. Этот эффект особенно заметен в том случае, если частота биений близка к частоте автоколебаний системы без биений (на участке «А-В» на рис. 4). В общем случае при варьировании частоты и амплитуды биений шпинделя наблюдаются эффекты формирования двумерного инвариантного тора, его вырождения в предельный цикл и образования хаотических аттракторов, который формируется после каскада бифуркаций удвоения периода колебаний (рис. 3). Однако формирование хаотических аттракторов наблюдается не во всех частотных диапазонах.

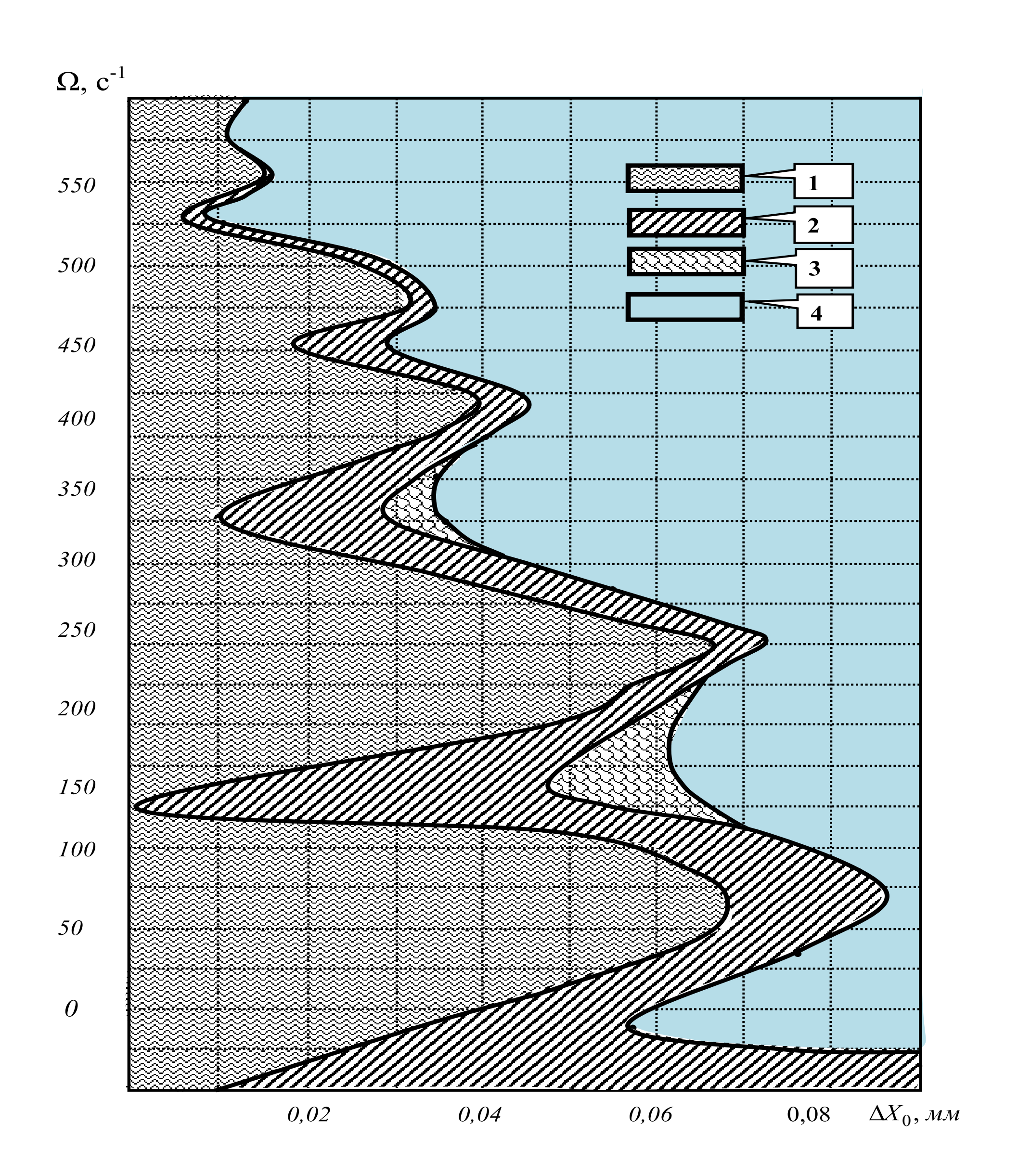
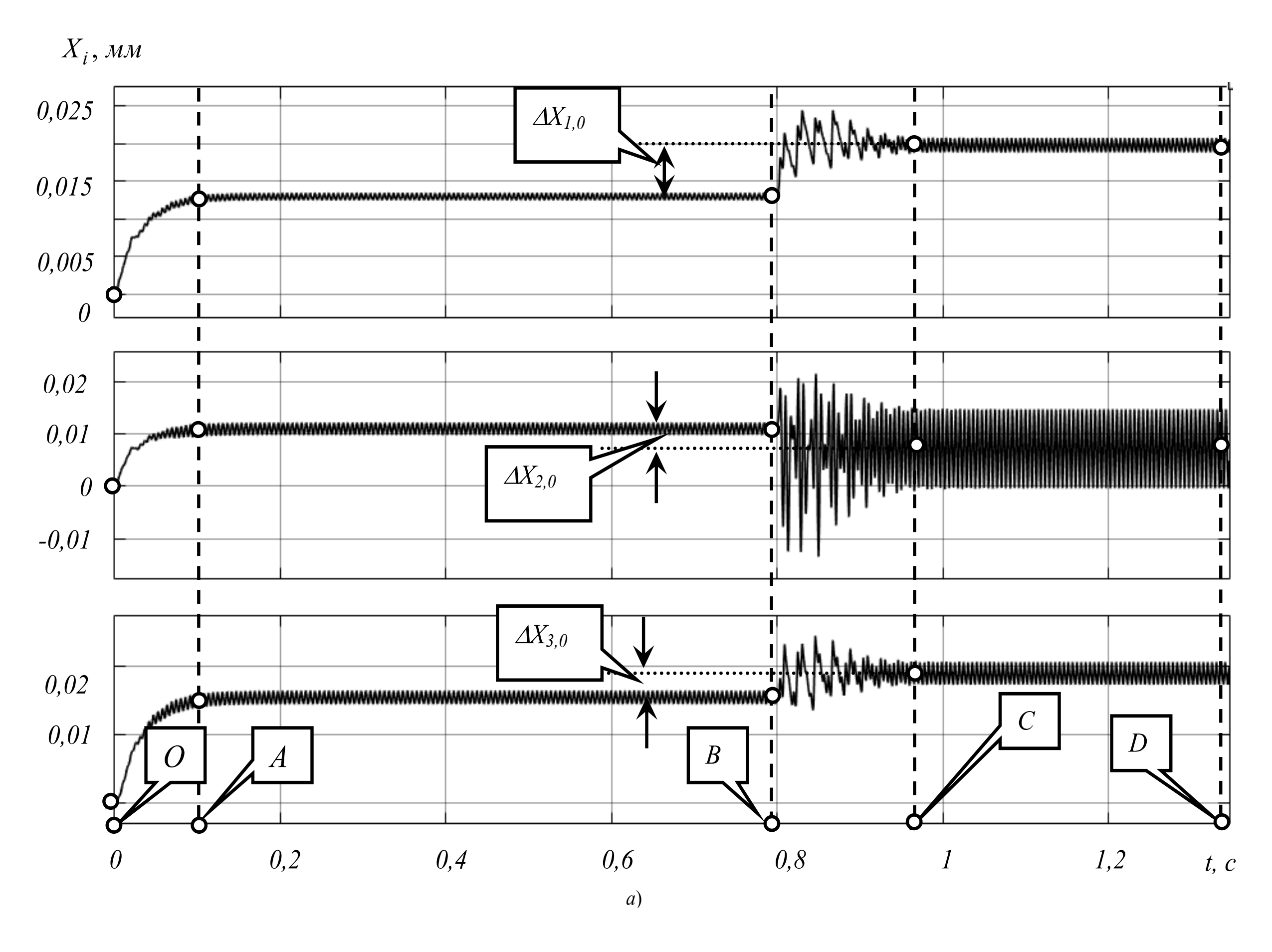


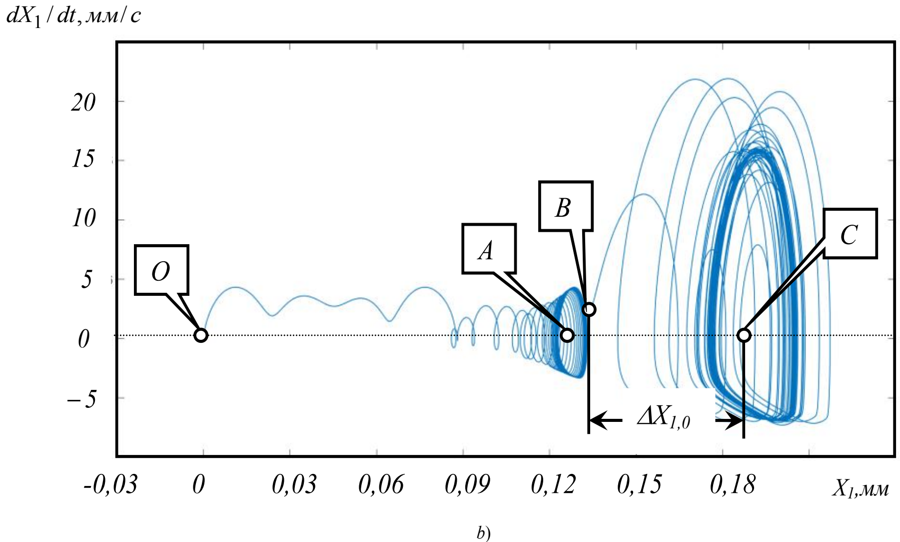
Рис. 3. Диаграмма бифуркаций притягивающих множеств:
1 — вынужденные одночастотные колебания (предельный цикл);
2 — двумерный инвариантный тор;
3 — установление хаотического аттрактора через каскад удвоения периода;
4 — система, неустойчивая в целом

Fig. 3. Diagram of attracting sets bifurcations:
1 - forced single-frequency oscillations (limit cycle);
2 - two-dimensional invariant torus;
3 - setting of chaotic attractor through period-doubling cascade;
4 - system unstable as a whole

Во всех случаях при фиксированной частоте существует предельное значение амплитуды биений, начиная с которой система становится неустойчивой в целом (область 5 на рис. 3). Причем, по мере увеличения частоты биений шпинделя, критические значения амплитуды периодически изменяются. Кроме этого, имеется тенденция уменьшения критической амплитуды по мере увеличения частоты.



а)



b)

Рис. 4. Пример переходных процессов деформационных смещений инструмента при частоте радиальных биений шпинделя равной 180 Гц: а — временные траектории; b — фазовая траектория для X_1 . На иллюстрации $(\Delta X_{1,0}, \Delta X_{2,0}, \Delta X_{3,0})$ — динамическое смещение точки равновесия подсистемы инструмента

Fig. 4. Example of transient processes of tool deformation displacements at frequency of spindle radial beating equal to 180 Hz: a - time trajectories; b - phase trajectory for X_1 *. On* $(\Delta X_{1,0}, \Delta X_{2,0}, \Delta X_{3,0})$ *illustration — dynamic displacement of the equilibrium point of tool subsystem*

Особенно наглядно эти эффекты можно проследить, если рассмотреть фазовые траектории деформационных смещений. Приведем некоторые примеры (рис. 5). Они соответствуют точкам, выделенным на рис. 3. Как видно, по мере увеличения амплитуды биений имеют место следующие преобразования притягивающих множеств. Начальному состоянию системы без биений шпинделя соответствуют автоколебания. При малых амплитудах биений шпинделя

наблюдается простое наложение автоколебаний на колебания, определяемые изменениями параметров, связанными с биениями. При дальнейшем увеличении амплитуды имеет место затягивание траектории к частоте, соответствующей частоте биений. Таким образом, инвариантный двумерный тор преобразуется в предельный цикл. Дальнейшее увеличение амплитуды вызывает каскад бифуркаций удвоения периода и формирование хаотического аттрактора. При дальнейшем увеличении амплитуды наблюдается потеря устойчивости системы в целом.

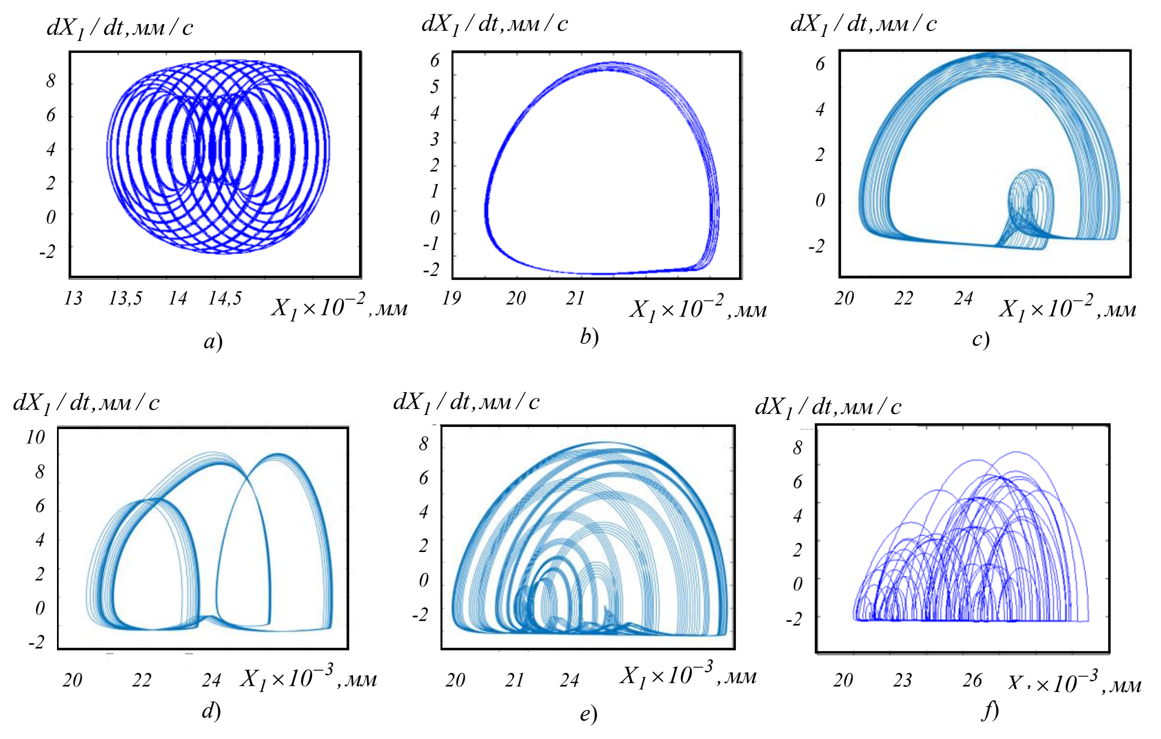


Рис. 5. Преобразование фазовых траекторий в плоскости ($X_1 - dX_1/dt$) для установившегося состояния по мере увеличения амплитуды биений шпинделя на частоте $\Omega = 190\ c^{-1}$

Fig. 5. Transformation of phase trajectories in ($X_1 - dX_1/dt$) plane for steady state with increase of spindle wavering amplitude at $\Omega = 190\ c^{-1}$ frequency

При увеличении частоты от 400 Гц и выше наблюдается практически полное наложение вынужденных колебаний на формируемые без биений автоколебания. При этом переходной процесс при установлении стационарного режима, соответствующего двумерному тору, становится малым, и он уменьшается по мере увеличения частоты биений шпинделя. Такое свойство наложения биений на автоколебания объясняется тем, что в рассматриваемом частотном диапазоне частоты биений лежат за пределами полосы пропускания упругой системы инструмента. Колебательные же смещения, обусловленные биениями, непосредственно прикладываются к режущему инструменту.

Анализ результатов. Свойства динамической системы резания принципиально зависят от динамической связи, формируемой процессом резания, характеристик взаимодействующих подсистем и вибрационных возмущений, определяемых биениями шпиндельной группы станка. Традиционные представления о преобразовании биений шпиндельной группы непосредственно в траектории формообразующих движений инструмента относительно детали и, следовательно, в характеристики геометрического качества формируемой резанием детали, далеко не всегда соответствуют действительности. Как показал анализ, установившиеся колебания деформационных смещений вершины инструмента относительно детали образуют различные притягивающие множества: предельные циклы, инвариантные торы и хаотические аттракторы. Причем, конфигурация, например, предельных циклов может быть достаточно сложной, так как вдоль траектории периодических движений изменяются свойства динамической связи. Более того, по мере увеличения частоты биений шпиндельной группы, вызывающие периодические изменения параметров системы, имеют место различные параметрические явления, в том числе параметрическое самовозбуждение системы. Кроме этого обнаружены эффекты динамического смещения точки равновесия, низкочастотной модуляции этого смещения. При определенных параметрах динамической связи и свойствах биений формируется хаотическая динамика. Как правило, она формируется после каскада бифуркаций удвоения периода колебаний. Все эти факторы, изменяя траектории формообразующих движений вершины инструмента, не только усложняют прогнозирование параметров точности и качества изготовления деталей, но и приводят к непредсказуемым эволюционным их изменениям.

Заключение. Периодические флуктуации параметров динамической характеристики процесса резания во многом определяются пространственными периодическими биениями шпиндельной группы с учетом точности установки заготовки. Флуктуации не только изменяют траектории формообразующих движений, но и влияют на динамическое качество процесса резания, в том числе устойчивость траекторий. Приведенный материал, созданные математические модели и методики изучения влияния возмущений на устойчивость не только дополняют знания о динамической системе резания, но и позволяют оценивать предельно достижимую точность обработки при управлении процессом резания и создании программы ЧПУ при обработке деталей на конкретном станке. Таким образом, для каждого станка существуют предельно достижимые показатели качества изготовления деталей, диктуемые текущим состоянием станка. Приведенный материал позволяет также оценивать достижимые параметры качества обработки на конкретном станке по параметрам биений шпинделя.

Библиографический список

1. Хакен, Г. Тайны природы. Учение о взаимодействии / Г. Хакен — Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований. — 2003. — 230 с.

2. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход. / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек. — Ростов-на-Дону : Терра. — 2006. — 76 с.

3. Заковоротный, В. Л. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода / В. Л. Закворотный, В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2014. — № 3 (178). — С. 33–41.

4. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D. The problems of control of the evolution of the dynamic system interacting with the medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2014. Т. 1. № 5.С. 271–285.

5. Заковоротный, В. Л. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек, Д. Т. Фам // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 10 (61). — С. 1785–1797.

6. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый ; пер. с чешск. — Москва : Машгиз, 1956. — 395 с.

7. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965. — 350 p.

8. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

9. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. WSEAS Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102 – 116.

10. Заковоротный, В. Л. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. —Т. 22, № 3. — С. 40–52.

11. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting. JournalofSoundandVibration. 2016. Т. 368. С. 174–190.

12. Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Станки и инструменты. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

13. Заковоротный, В. Л. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Станки и инструменты. — 2016. — № 6. — С. 10–16.

14. Заковоротный, В. Л. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Станки и инструменты. — 2016. — №8. — С. 27–33.

15. Заковоротный, В. Л. Фам Т.Х. Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания / В. Л. Заковоротный, Т. Х. Фам // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 5–6 (74). — С. 97–103.

16. Заковоротный, В. Л. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 2 (53). — С. 137–146.

17. Заковоротный, В. Л. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 3 (54). — С. 301–311.

18. Заковоротный, В. Л. Влияние кинематических возмущений в направлении продольной подачи на траектории формообразующих движений / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2016. — №4. — С. 67–76.

19. Заковоротный, В. Л. Особенности преобразования траекторий исполнительных элементов токарного станка в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки / В. Л. Заковоротный, Д. Т. Фам // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2011. — №4. — С. 69–75.

20. Заковоротный, В. Л. Влияние погрешности движения исполнительных элементов токарного станка на траектории формообразующих движений / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — № 1(88). — С. 35–46.

21. Заковоротный, В. Л. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 52–61

22. Точность механической обработки и пути ее повышения. / под ред. А. П. Соколовского. — Москва, Ленинград (Санкт-Петербург): Машгиз, 1951. — С. 453–465.

23. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D.Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts.Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, No. 11, pp. 956–964.

24. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D.Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine.Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, No. 12, pp. 1033–1039.

25. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D. Attractive Sets in End Milling. Russian Engineering Research, 2017, Vol. 37, No. 2, pp. 158–163.

References

1. Haken, H. Tayny prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodeystvii. [Nature's secrets. Synergetics: interaction theory.] Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Science, 2003, 320 p. (in Russian).

2. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Cutting process dynamics. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: Terra, 2006, 880 p. (in Russian).

3. Zakovorotny, V.L., Lapshin, V.P., Turkin, I.A. Upravlenie protsessom sverleniya glubokikh otverstiy spiral'nymi sverlami na osnove sinergeticheskogo podkhoda. [Process control drilling deep holes twist drills based on the synergetic approach.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2014, no. 3 (178), pp. 33–41 (in Russian).

4. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. The problems of control of the evolution of the dynamic system interacting with the medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 271–285.

5. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F., Pham Dinh Tung. Sinergeticheskaya kontseptsiya pri postroenii sistem upravleniya tochnost'yu izgotovleniya detaley slozhnoy geometricheskoy formy. [Synergetic concept in construction of accuracy control systems for manufacturing parts of complex geometric forms.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 10 (61), pp. 1785–1797 (in Russian).

6. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-excitation vibrations in cutting machines.] Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian)

7. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965, 350 p.

8. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

9. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. WSEAS Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2015, vol. 10, pp. 102 – 116.

10. Zakovorotny, V.L., Pham D.-T., Bykador, V.S. Vliyanie izgibnykh deformatsiy instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy rezaniya metallov. [Influence of a flexural deformation of a tool on self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40–52 (in Russian).

11. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D., Gubanova, A.A., Khristoforova, V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting. JournalofSoundand Vibration, 2016, vol. 368, pp. 174–190.

12. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoy kontseptsii dlya izucheniya ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya. [Use of synergetic concept for studying stability of forming trajectories of climb cutting.] STIN, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

13. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoy sistemy frezerovaniya kontsevymi frezami. [Conditions for parametric self-excitation of dynamic end milling system.] STIN, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).

14. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami. [Attracting sets under end milling.] STIN, 2016, no. 8, pp. 27–33 (in Russian).

15. Zakovorotny, V.L., Pham D.T. Parametricheskoe samovozbuzhdenie dinamicheskoy sistemy rezaniya. [Parametric self-excitation of cutting dynamic system.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 5/6 (74), pp. 97–103 (in Russian).

16. Zakovorotny, V.L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (velocity coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 1, no. 2 (53), pp. 137–146 (in Russian).

17. Zakovorotny, V.L., et al. Modelirovanie dinamicheskoy svyazi, formiruemoy protsessom tocheniya (pozitsionnaya svyaz'). [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling).] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311 (in Russian).

18. Zakovorotny, V.L., Gvindzhiliya, V.E. Vliyanie kinematicheskikh vozmushcheniy v napravlenii prodol'noy podachi na traektorii formoobrazuyushchikh dvizheniy. [The influence of kinematic perturbations towards longitudinal motion on shape-generating movement trajectories in cutting dynamic system.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2016, no. 4, pp. 67–76 (in Russian).

19. Zakovorotny, V.L., Pham Dinh Tung. Osobennosti preobrazovaniya traektoriy ispolnitel'nykh elementov stanka v traektorii formoobrazuyushchikh dvizheniy instrumenta otnositel'no zagotovki. [Features of transformation of machine actuator trajectories into the trajectories of forming tool movements relative to the workpiece.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2011, no. 4, pp. 69–75 (in Russian).

20. Zakovorotny, V.L., Gvindzhiliya, V.E. Vliyanie pogreshnosti dvizheniya ispolnitel'nykh elementov tokarnogo stanka na traektorii formoobrazuyushchikh dvizheniy. [Error effect of executive elements movement of the lathe tool on forming motion paths.] Vestnik of DSTU, 2017, no. 1(88), pp. 35–46 (in Russian).

21. Zakovorotny, V.L., Gvindzhiliya, V.E. Vliyanie fluktuatsiy na ustoychivost' formoobrazuyushchikh traektoriy pri tochenii. [The influence of fluctuation on the shape-generating trajectories stability with a turning.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2017, no. 2, pp. 52–61 (in Russian).

22. Sokolovskiy, A.P., ed. Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i puti ee povysheniya. [Machining accuracy and ways of its improvement.] Moscow, Leningrad (St. Petersburg): Mashgiz, 1951, pp. 453–465 (in Russian).

23. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D .Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 11, pp. 956–964.

24. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 1033–1039.

25. Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Attractive Sets in End Milling. Russian Engineering Research, 2017, vol. 37, vo. 2, pp. 158–163.

Поступила в редакцию 16.07.2017
Сдана в редакцию 16.07.2017
Запланирована в номер 05.10.2017

Received 16.07.2017
Submitted 16.07.2017
Scheduled in the issue 05.10.2017

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Енвериевна
магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1066-4604
sinedden@yandex.ru

Authors:

Zakovorotny, Vilor L.,
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-000-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Gvindzhilya, Valeria E.
Master of Sci. of the Production Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1066-4604
sinedden@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 535.854 10.23947/1992-5980-2017-17-4-34-43

Обработка результатов измерений интенсивности оптических полей интерференционных картин, создаваемых лазерными интерференционными средствами измерений[*]

И. П. Мирошниченко[1]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Data processing of measuring intensity of optical field fringe patterns generated by laser interference measuring means[***]

I. P. Miroshnichenko[1]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Современные методы и средства лазерной интерферометрии открывают новые возможности при исследовании свойств и процессов дефектообразования в новых материалах (слоистых, полимерных, композиционных), диагностики состояния конструкционных материалов силовых элементов изделий на всех этапах их жизненного цикла. Одним из направлений повышения качества результатов измерений может быть внедрение нового программного обеспечения (ПО) для анализа результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, однозначно связанных с измеряемыми малыми перемещениями поверхностей объектов контроля. Целью работы являлось создание нового ПО. В данном случае оно предназначено для обработки результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов. Решение основано на лазерном двухходовом интерферометре с совмещенными ветвями, что позволяет повысить качество результатов измерений.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели применено современное ПО, использованы результаты, полученные новыми средствами измерений на основе новых оптических интерференционных методов.

Результаты исследования. Создано ПО для обработки результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов. Новый программный продукт, позволяющий повысить качество результатов измерений, защищен свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Обсуждение и заключение. Предлагаемое ПО может быть успешно использовано для моделирования процессов измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля при создании новых методов обработки интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений, построенными на основе лазерных интерферометров различных типов. Описанные в статье ПО и технические решения про-

Introduction. Currently, the introduction of modern methods and means of laser interferometry opens up new possibilities in solving various practical problems under studying properties and processes of defect formation in new materials (laminated, polymeric, composite), and diagnosing the state of structural materials of the product power components at all stages of their life cycle. One of the ways to improve the measurement results quality can be the introduction of new software for the outcome analysis of the intensities of the optical fields of interference patterns uniquely associated with the metered small displacements of control objects surfaces. The work objective is to develop new software for processing data of measuring intensities of the optical fields of interference patterns generated by the optical instrumentation of small linear and angular displacements of the control objects surfaces. The solution is based on the two-way laser interferometer with combined branches that allows increasing the measurement results quality.

Materials and Methods. To achieve this purpose, modern software is applied, and the data obtained with new measuring instruments based on new optical interference methods is used.

Research Results. New software is developed for processing the measurement results of the intensities of the optical fields of interference patterns generated by the optical instrumentation of small linear and angular displacements of the control objects surfaces based on the proposed two-pass laser interferometer with combined branches. New software allows improving the measurement data quality. It is protected by certificates of the Russian Federation on the state registration of computer programs.

Discussion and Conclusions. The proposed software can be used successfully for simulating measurements of small linear and angular displacements of the control objects surfaces in order to create new methods of treatment of the intensities of the optical fields of interference patterns generated by the optical instrumentation based on laser interferometers of various types. The described software and technical solutions received approval at the

[*]Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № 9.9770.2017 и при частичной поддержке гранта РФФИ № 16–08–00740.
[**]E-mail: ipmir@rambler.ru
[***] The research is done within the frame of government task no. 9.9770.2017 and is supported in part by RFFI grant no. 16–08–00740.

шли апробацию на международных научно-технических конференциях в 2016–2017 гг., были представлены на Международных инновационных салонах «Inventions Geneva 2017» и «Euroinvent 2017».

International scientific conferences in 2016–2017, and they were also presented at the International innovation salons "Inventions Geneva 2017" and "Euroinvent 2017".

Ключевые слова: лазерный интерферометр, измерения малых перемещений, объект контроля, диагностика состояния.

Keywords: laser interferometer, measurements of small displacements, control object, diagnostics of condition.

Образец для цитирования: Мирошниченко, И. П. Обработка результатов измерений интенсивности оптических полей интерференционных картин, создаваемых лазерными интерференционными средствами измерений / И. П. Мирошниченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 34–43.

For citation: I.P. Miroshnichenko. Data processing of measuring intensity of optical field fringe patterns generated by laser interference measuring means. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp.34–43.

Введение. Внедрение современных методов и средств лазерной интерферометрии открывает новые возможности при решении актуальных практических задач исследования свойств и процессов дефектообразования в новых материалах (в том числе слоистых, полимерных, композиционных) и диагностики состояния конструкционных материалов силовых элементов изделий на всех этапах их жизненного цикла.

Одним из наиболее предпочтительных для решения научных и производственных задач является лазерный двухходовой интерферометр с совмещенными ветвями, предложенный в [1–2]. Данный прибор был модифицирован для бесконтактного измерения малых перемещений поверхностей объектов при диагностике состояния материалов акустическими неразрушающими методами контроля. Экспериментальные исследования функциональных характеристик модифицированного интерферометра подробно описаны в [3–5].

Разработаны новые математические модели и оригинальное программное обеспечение (ПО) для моделирования интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых указанным интерферометром, модифицированным для решения измерительных задач. Это ПО защищено свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ. Проведено численное моделирование для различных вариантов оптических схем с учетом особенностей их составных частей (геометрических характеристик, вида светоделителя и т. п.). Результаты проведенных изысканий подробно описаны в работах [6–7].

С учетом результатов численного и экспериментального моделирования созданы новые оптические средства для бесконтактных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Кроме того, по итогам проведенных исследований были предложены новые решения для регистрации интенсивности оптических полей интерференционных картин, однозначно связанных с измеряемыми перемещениями, способы и средства защиты от влияния внешних и внутренних дестабилизирующих воздействий на результаты измерений. Изобретения, реализованные в предложенных средствах измерений, защищены патентами Российской Федерации. Функциональные характеристики опытных образцов данных средств измерений были численно и экспериментально исследованы и обоснованы. Результаты изложены в работах [8–10].

В работах [11–12] представлены новые способ и оптическое устройство для измерения малых пространственных (линейных и всех угловых) перемещений поверхностей объектов контроля.

В работах [9–10] также описаны технические решения, защищенные патентами Российской Федерации на изобретения, позволяющие использовать разработанные оптические средства измерений в составе мобильных диагностических комплексов и проводить измерения контролируемых малых перемещений по месту эксплуатации диагностируемых объектов без потери функциональных свойств и точностных характеристик.

Указанные средства измерений были успешно применены при экспериментальных исследованиях процессов дефектообразования в тонких образцах ленточных высокотемпературных сверхпроводников, а также при разработке методов контроля их качества в процессе производства. Экспериментально-измерительные устройства описаны в работах [13–14].

Опытная эксплуатация перечисленных выше оптических средств показала, что одним из направлений повышения качества измерений может быть создание и внедрение нового ПО для обработки результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, однозначно связанных с измеряемыми малыми перемещениями поверхностей объектов контроля.

Цель исследования — создание нового ПО для обработки результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Новое решение базируется на лазерном двухходовом интерферометре с совмещенными ветвями.

Программное обеспечение для обработки результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин и примеры его использования. При создании комплекса использовано программное обеспечение *MathCad* 2000 *Professional* и выше.

Программы, объединенные в данном комплексе, основаны на типовом алгоритме, моделируют определенный вариант сбора информации об интенсивности оптического поля интерференционной картины и обрабатывают полученные сведения с помощью различных статистических методов. Данные могут считываться одиночным фотоприемным устройством, группой фотоприемных устройств, матрицей фотоприемных устройств с заданными геометрическими характеристиками и т. д. с заданных областей интерференционной картины:

— в одном из колец интерференционной картины;
— в нескольких кольцах интерференционной картины;
— в выделенной области интерференционной картины и т. п.

В каждой программе комплекса ПО реализован типовой алгоритм моделирования процесса измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля оптическими интерференционными средствами измерений, сущность которого может быть наглядно показана на наиболее простом примере измерения малого линейного перемещения поверхности объекта контроля одиночным фотоприемным устройством (например, фотодиодом типа ФД9), установленным в одном из колец интерференционной картины.

Исходными данными для обработки являются геометрические характеристики фотоприемного устройства, а также представленные в стандартных графических форматах изображения интерференционных картин ($n = 1, 2 \ldots N$), каждая n-я из которых соответствует определенному моменту измерения (малому линейному перемещению) в процессе регистрации изображения интерференционной картины, при котором воспроизводилось заданное значение малого линейного перемещения поверхности объекта контроля.

Укрупненно данный алгоритм, реализованный в ПО, может быть представлен следующим образом.

1. Визуализация и анализ интенсивности оптического поля исходной интерференционной картины ($n = 1$), характеризующей исходное положение поверхности объекта контроля, внешний вид которой представлен на рис. 1.

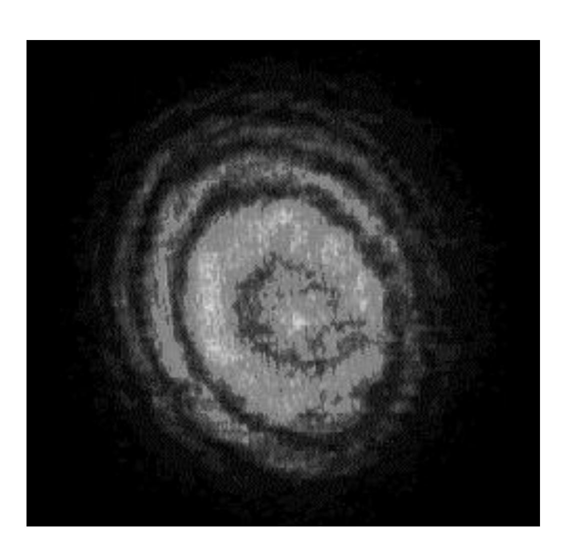


Рис. 1. Внешний вид исходной интерференционной картины ($n = 1$)

Fig. 1. Appearance of original interference pattern (n = 1)

2. Визуализация и анализ интенсивностей оптических полей всех интерференционных картин, входящих в набор изображений ($n = 1, 2 \ldots N$, для примера $N = 31$), соответствующих определенным моментам измерений (линейным перемещениям) в процессе регистрации. Внешний вид интерференционных картин $n = 1, 2 \ldots 9$ представлен на рис. 2.

n = 1 *n* = 2 *n* = 3

n = 4 *n* = 5 *n* = 6

n = 7 *n* = 8 *n* = 9

Рис. 2. Внешний вид интерференционных картин (*n* = 1, 2…9)

Fig. 2. Appearance of interference patterns (n = 1, 2...9)

3. Выбор области на исходной интерференционной картине (*n* = 1), ограниченной заданными геометрическими характеристиками фотоприемного устройства, путем нанесения горизонтальных и вертикальных линий (разметки) и ее визуализация (рис. 3).

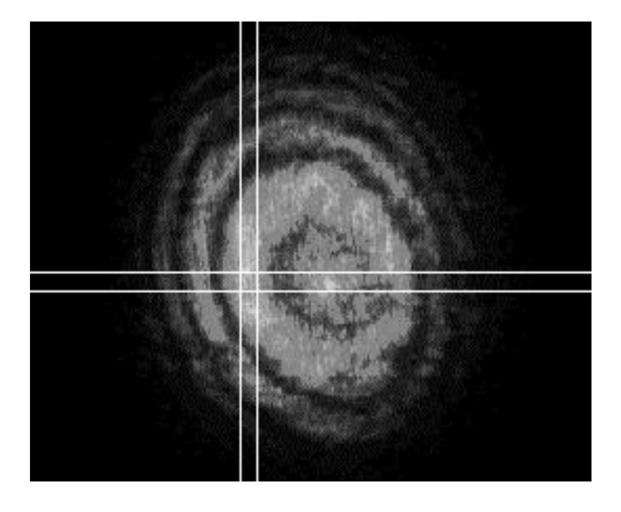


Рис. 3. Внешний вид разметки на исходной интерференционной картине (*n* = 1)

Fig. 3. Appearance of markings on original interference pattern (n = 1).

4. Визуализация выбранной области исходной интерференционной картины (n = 1), ограниченной заданными геометрическими характеристиками фотоприемного устройства (рис. 4).

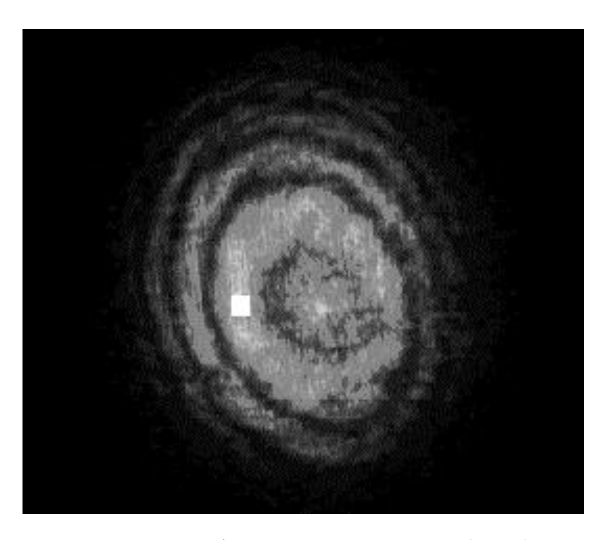


Рис. 4. Внешний вид исходной интерференционной картины (n = 1) с выбранной областью

Fig. 4. Appearance of original interference pattern (n = 1) with selected area

5. Задание и визуализация выбранной области на всех интерференционных картинах (n = 1,2…31), входящих в набор с использованием параметров исходной интерференционной картины. Внешний вид интерференционных картин (n = 1,2…9) представлен на рис. 5.

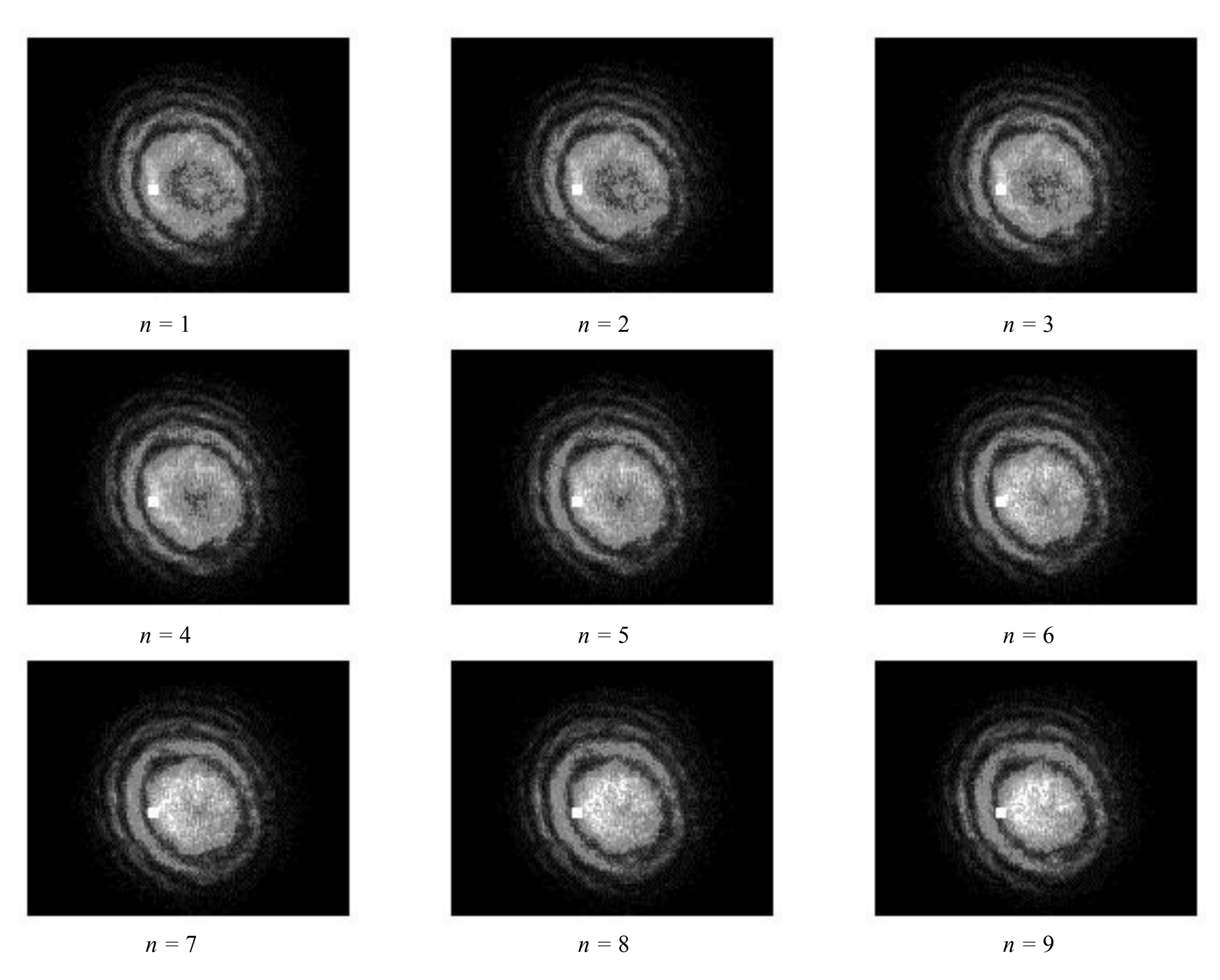


Рис. 5. Внешний вид интерференционных картин (n = 1 ,2…9) с выбранными областями

Fig. 5 Appearance of interference patterns (n = 1, 2...9) with selected areas

6. Определение суммарной интенсивности I_s по выбранной области для всех интерференционных картин, входящих в набор (n = 1,2…31), и построение зависимости изменения рассчитанной суммарной интенсивности I_s по выбранной области для каждого из моментов регистрации (рис. 6).

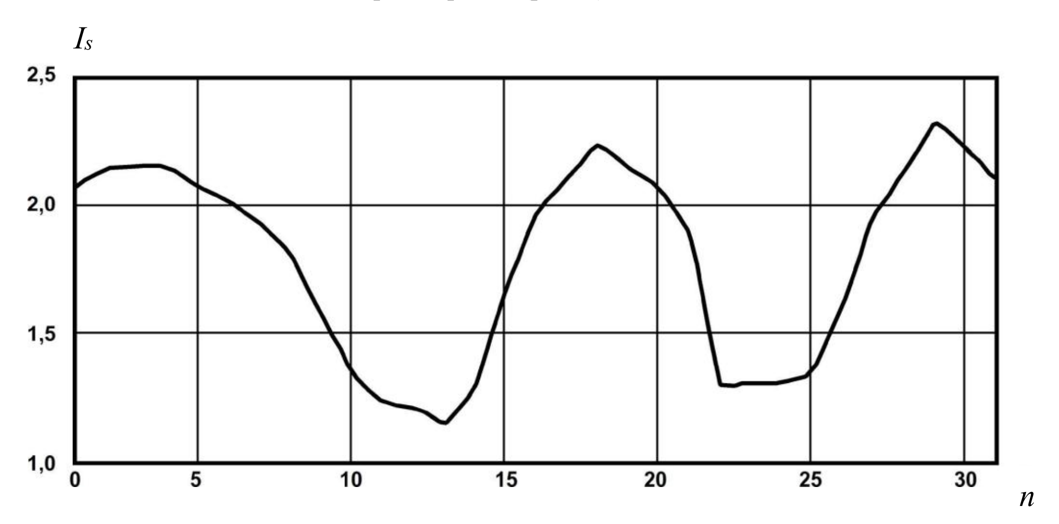


Рис. 6. Зависимость суммарной интенсивности I_s по выбранной области интерференционных картин (n = 1, 2…31)

Fig. 6. Dependence of total intensity I_s in selected area of interference patterns (n = 1, 2...31)

7. Обработка полученных результатов с использованием встроенных средств известного программного обеспечения, реализующих методы статистической обработки и прогнозирования. На рис. 7 для примера приведена зависимость суммарной интенсивности I_s по выбранной области интерференционных картин (n = 1,2…31) после проведения статистической обработки при помощи встроенных средств *MathCad* 2000 *Professional*.

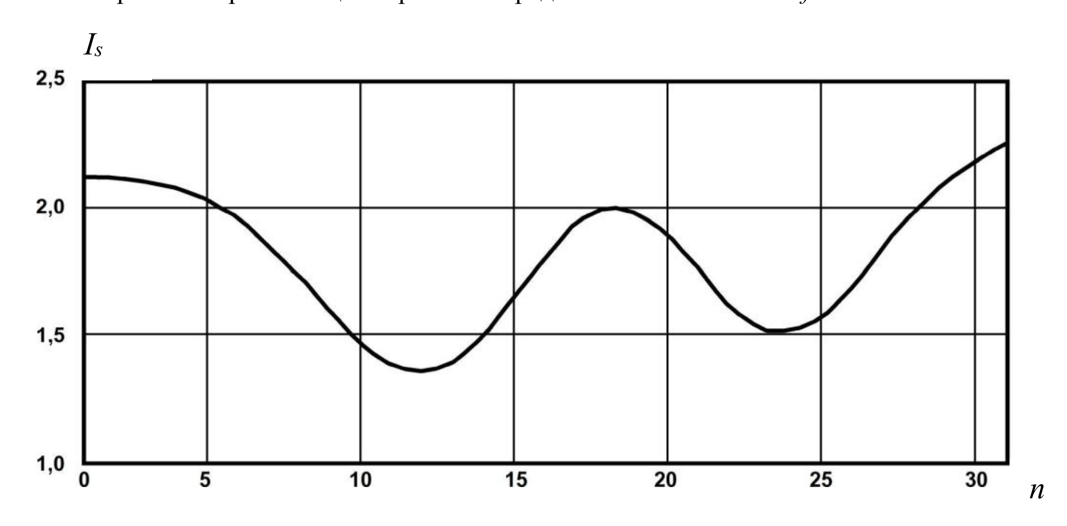


Рис. 7. Зависимость суммарной интенсивности I_s по выбранной области интерференционных картин (n = 1, 2…31) после проведения статистической обработки

Fig. 7. Dependence of total intensity I_s in selected area of interference patterns (n = 1, 2...31) after statistical processing

В настоящее время разработанный комплекс ПО включает программы для обработки результатов измерений интенсивностей, полученных:

— при помощи двух фотоприемных устройств, установленных в прилегающих друг к другу кольцах интерференционной картины (рис. 8);

— при регистрации интенсивности с выделенной области интерференционной картины, отличающейся максимальной контрастностью, в соответствии с техническим решением [15] (рис. 9);

— для вертикальных и горизонтальных выделенных областей (рис. 10);

— для корректировки результатов измерений на основе анализа суммарной интенсивности оптического поля интерференционной картины в соответствии с техническим решением [16].

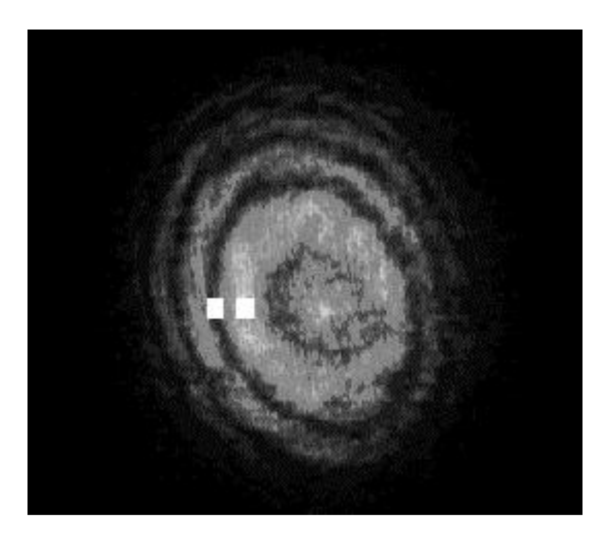


Рис. 8. Внешний вид исходной интерференционной картины (n = 1) с выбранными областями для варианта регистрации при помощи двух фотоприемных устройств

Fig. 8. Appearance of original interference pattern (n = 1) with selected areas for register option by means of two photodetectors

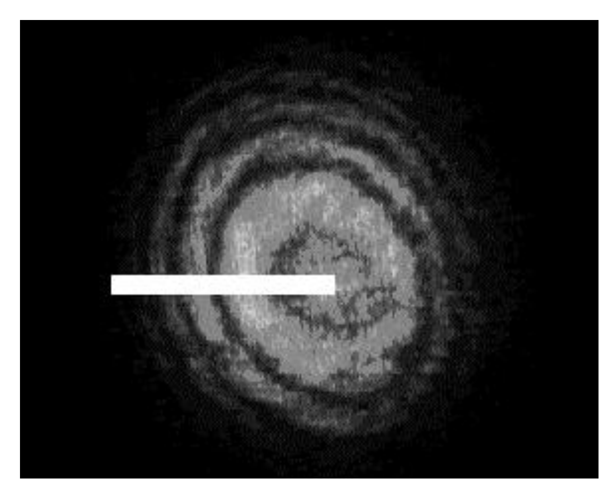


Рис. 9. Внешний вид исходной интерференционной картины (n = 1) с выбранной областью для варианта регистрации интенсивности с выделенной области

Fig. 9. Appearance of original interference pattern (n = 1) with selected area for intensity register option from selected area

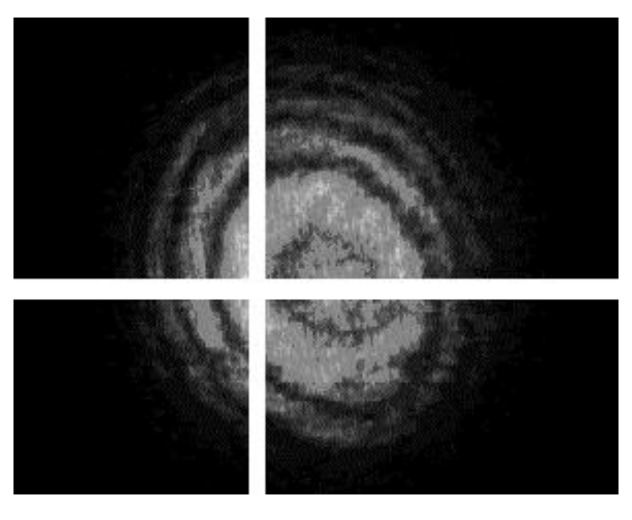


Рис. 10. Внешний вид исходной интерференционной картины (n = 1) с выбранной областью для варианта регистрации интенсивностей с вертикальных и горизонтальных выделенных областей

Fig. 10. Appearance of original interference pattern (n = 1) with selected area for option of registration of intensities from vertical and horizontal selected areas

Описанные выше программы, входящие в комплекс ПО, защищены свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ [17–21], апробированы при обработке результатов экспериментальных исследований функциональных характеристик перспективных оптических средств измерений.

Работы над описанным комплексом продолжаются. Очевидно, в дальнейшем предложенные алгоритм и ПО будут развиваться по следующим направлениям:

— создание типовых унифицированных алгоритмов для моделирования различных вариантов процессов измерений и обработки результатов измерений малых пространственных перемещений поверхностей объектов контроля;

— автоматизация процесса обработки.

Заключение. Новое ПО обеспечивает обработку результатов измерений интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Решение основано на лазерном двухходовом интерферометре с совмещенными ветвями.

С помощью данного программного комплекса процессы измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов могут быть адекватно смоделированы для обоснования новых методов обработки интенсивностей оптических полей интерференционных картин, создаваемых оптическими средствами измерений, основанными на лазерных интерферометрах различных типов.

Предлагаемое ПО защищено свидетельствами Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ и позволяет повысить качество результатов измерений при исследовании дефектообразования в новых материалах, а также при акустической неразрушающей диагностике состояния конструкционных материалов силовых элементов изделий на всех этапах их жизненного цикла.

Описанные в статье ПО и технические решения были представлены на международных научно-технических конференциях в 2016–2017 гг., на международных инновационных салонах «Inventions Geneva — 2017» и «Euroinvent-2017», где получили высокие оценки специалистов и были награждены золотыми медалями.

Библиографический список

1. Матвеев, А. Н. Оптика / А. Н. Матвеев. — Москва : Высшая школа, 1985. — 351 с.

2. Батраков, А. С. Лазерные измерительные системы / А. С. Батраков, М. М. Бутусов, Г. П. Гречка. — Москва : Радио и связь, 1981. — 456 с.

3. Мирошниченко, И. П. Результаты экспериментальных исследований интерференционного измерителя малых перемещений / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Измерительная техника. — 2006. — № 5. — С. 22–25.

4. Мирошниченко, И. П. Особенности использования интерференционных измерителей малых перемещений при решении задач диагностики технического состояния конструкций / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. — 2007. — № 4. — С. 31–38.

5. Мирошниченко, И. П. Унифицированный метод измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. — 2008. — № 5. — С. 23–27.

6. Мирошниченко, И. П. Численное исследование метода измерений малых линейных и угловых перемещений лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Измерительная техника. — 2007. — № 1. — С. 9–13.

7. Мирошниченко, И. П. Использование точечного источника излучения для расширения функциональных возможностей измерителя перемещений / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Оптический журнал. — 2008. — Т. 75, № 7. — С. 41–47.

8. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Object Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites / I. P. Miroshnichenko [et al.] // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. — New York : Nova Science Publishers, 2012. — P. 239–282.

9. Novel Optical Means for Measurement of Displacements of Surfaces of the Control Objects at Diagnostics of Materials and Goods / I. P. Miroshnichenko [et al.] // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. — New York : Nova Science Publishers, 2013. — P. 145–154.

10. Mathematical Models, Program Software, Technical and Technological Solutions for Measurement of Displacements of the Control Object Surfaces by Laser Interferometer / I. P. Miroshnichenko [et al.] // Advanced Materials Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. — Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer Cham, 2016. — Vol. 175. — P. 341–356.

11. Miroshnichenko, I. P. Scientific Ground of a New Optical Device for Contactless Measurement of the Small Spatial Displacements of Control Object Surfaces / I. P. Miroshnichenko, I. A. Parinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 209. — 012054. — P. 1–8.

12. Novel Optical Interference Means to Measure Small Linear and Angular Displacements of Control Object Surfaces / I. P. Miroshnichenko [et al.] // Advanced Materials — Techniques, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. — Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer Cham, 2017. — Vol. 193. — P. 591–605.

13. Экспериментальная установка для исследования процессов дефектообразования в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках / И. П. Мирошниченко [и др.] // Металлург. — 2006. — № 7. — С. 77–78.

14. Мирошниченко, И. П. Усовершенствованная экспериментальная установка для исследования процессов дефектообразования в образцах конструкционных материалов / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Металлург. — 2010. — № 3. — С. 68–69.

15. Оптическое устройство для измерения перемещений : патент 2373492 Рос. Федерация : МПК G 01 B 11/00, G 01 B 21/00. / И. П. Мирошниченко [и др.]. — № 2007144257/28 ; заявл. 28.11.07 ; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32. — 7 с.

16. Способ регистрации перемещений оптическими датчиками : патент 2343403 Рос. Федерация : МПК G 01 B 11/00 / И. П. Мирошниченко [и др.]. — № 2007110769/28 ; заявл. 26.03.07 ; опубл. 10.01.09, Бюл. № 1. — 5 с.

17. Программа для визуализации и обработки распределений интенсивности оптического поля интерференционной картины, создаваемой лазерным интерферометром : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2017614710 Рос. Федерация / И. П. Мирошниченко. — № 2017611671, заявл. 03.03.17 ; зарег. 26.04.17 ; опубл. 20.05.17, Бюл. № 5. — 10 с.

18. Программа для визуализации и обработки зависимостей интенсивности оптического поля в выделенной области интерференционной картины : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2017614861 Рос. Федерация / И. П. Мирошниченко. — № 2017611728 ; заявл. 03.03.2017 ; зарег. 02.05.17 ; опубл. 20.05.17, Бюл. № 5. — 10 с.

19. Программа для визуализации и статистической обработки распределений интенсивности оптического поля в выделенных областях интерференционной картины : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2017614715 Рос. Федерация / И. П. Мирошниченко. — № 2017611722 ; заявл. 03.03.17 ; зарег. 02.05.17 ; опубл. 20.05.17, Бюл. № 5. — 12 с.

20. Программа для визуализации и статистической обработки распределений интенсивности оптического поля в областях интерференционной картины, ограниченных геометрическими характеристиками фотоприемных устройств : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2017614764 Рос. Федерация / И. П. Мирошниченко. — № 2017611682 ; заявл. 03.03.17 ; зарег. 26.04.17 ; опубл. 20.05.17, Бюл. № 5. — 11 с.

21. Программа для корректировки результатов измерений интенсивности оптического поля интерференционной картины : св-о о гос. регистрации программы для ЭВМ 2017614900 Рос. Федерация / И. П. Мирошниченко. — № 2017611687 ; заявл. 03.03.17 ; зарег. 27.04.17 ; опубл. 20.05.17, Бюл. № 5. — 8 с.

References

1. Matveev, A.N. Optika. [Optics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 351 p. (in Russian).

2. Batrakov, A.S., Butusov, M.M., Grechka, G.P. Lazernye izmeritel'nye sistemy. [Laser measurement systems.] Moscow: Radio i svyaz', 1981, 456 p. (in Russian).

3. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy interferentsionnogo izmeritelya malykh peremeshcheniy. [Results of the experimental study for the interferometric meter of minor movements.] Measurement Technique, 2006, no. 5, pp. 22–25 (in Russian).

4. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Osobennosti ispol'zovaniya interferentsionnykh izmeriteley malykh peremeshcheniy pri reshenii zadach diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya konstruktsiy. [Using interferometers for the measurement of small displacements during solution of the problems of the state of structures.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, no. 4, pp. 31–38 (in Russian).

5. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Unifitsirovannyy metod izmereniya malykh lineynykh i uglovykh peremeshcheniy poverkhnostey ob"ektov kontrolya. [A unified method for measuring small linear and angular displacements of the surfaces of tested objects.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, no. 5, pp. 23–27 (in Russian).

6. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G., Sizov, V.P. Chislennoe issledovanie metoda izmereniy malykh lineynykh i uglovykh peremeshcheniy lazernymi interferometrami. [Numerical study of a method measuring small linear and angular displacements by laser interferometers.] Measurement Technique, 2007, no. 1, pp. 9–13 (in Russian).

7. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G., Sizov, V.P. Ispol'zovanie tochechnogo istochnika izlucheniya dlya rasshireniya funktsional'nykh vozmozhnostey izmeritelya peremeshcheniy. [Using a point radiation source to extend the functional possibilities of a device for measuring displacements.] Journal of Optical Technology, 2008, vol. 75, no. 7, pp. 41–47 (in Russian).

8. Miroshnichenko, I.P., et al. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Object Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites. Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2012, pp. 239–282.

9. Miroshnichenko, I.P., et al. Novel Optical Means for Measurement of Displacements of Surfaces of the Control Objects at Diagnostics of Materials and Goods. Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, pp. 145–154.

10. Miroshnichenko, I.P., et al. Mathematical Models, Program Software, Technical and Technological Solutions for Measurement of Displacements of the Control Object Surfaces by Laser Interferometer. Advanced Materials Manufacturing,

Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer Cham, 2016, vol. 175, pp. 341–356.

11. Miroshnichenko, I.P., Parinov, I.A. Scientific Ground of a New Optical Device for Contactless Measurement of the Small Spatial Displacements of Control Object Surfaces. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 209 — 012054, pp. 1–8.

12. Miroshnichenko, I.P., et al. Novel Optical Interference Means to Measure Small Linear and Angular Displacements of Control Object Surfaces. Advanced Materials — Techniques, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer Cham, 2017vol. 193, pp. 591–605.

13. Miroshnichenko, I.P., et al. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya protsessov defektoobrazovaniya v lentochnykh vysokotemperaturnykh sverkh-provodnikakh. [Experimental plant for research of defect formation in band high temperature superconductors.] Metallurgist*,* 2006, no. 7, pp. 77–78 (in Russian).

14. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Usovershenstvovannaya eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya protsessov defektoobrazovaniya v obraztsakh konstruktsionnykh materialov. [Improved experimental plant for investigation of defect formation processes in samples of constructional materials.] Metallurgist, 2010, no. 3, pp. 68–69 (in Russian).

15. Miroshnichenko, I.P., et al. Opticheskoe ustroystvo dlya izmereniya peremeshcheniy: patent 2373492 Ros. Federatsiya: MPK G 01 B 11/00, G 01 B 21/00. [Optical device for measuring displacements.] Patent RF, no. 2373492, 2009 (in Russian).

16. Miroshnichenko, I.P., et al. Sposob registratsii peremeshcheniy opticheskimi datchikami: patent 2343403 Ros. Federatsiya: MPK G 01 B 11/00. [The technique of detecting displacements by optical sensors.] Patent RF, no. 2343403, 2009 (in Russian).

17. Miroshnichenko, I.P. Programma dlya vizualizatsii i obrabotki raspredeleniy intensivnosti opticheskogo polya interferentsionnoy kartiny, sozdavaemoy lazernym interferometrom: sv-vo o gos. registratsii programmy dlya EVM 2017614710 Ros. Federatsiya. [Program for visualizing and processing the intensity of the optical field of interference pattern produced by laser interferometer.] RF Certificate of software registration, no. 2017614710, 2017 (in Russian).

18. Miroshnichenko, I.P. Programma dlya vizualizatsii i obrabotki zavisimostey intensivnosti opticheskogo polya v vydelennoy oblasti interferentsionnoy kartiny: sv-vo o gos. registratsii programmy dlya EVM 2017614861 Ros. Federatsiya. [Program for visualization and processing of the optical field intensity dependencies in the selected area of the interference pattern.] RF Certificate of software registration, no. 2017614861, 2017 (in Russian).

19. Miroshnichenko, I.P. Programma dlya vizualizatsii i statisticheskoy obrabotki raspredeleniy intensivnosti opticheskogo polya v vydelennykh oblastyakh interferentsionnoy kartiny: sv-vo o gos. registratsii programmy dlya EVM 2017614715 Ros. Federatsiya. [Program for visualization and statistical processing of the optical field intensity distributions in the selected areas of the interference pattern.] RF Certificate of software registration, no. 2017614715, 2017 (in Russian).

20. Miroshnichenko, I.P. Programma dlya vizualizatsii i statisticheskoy obrabotki raspredeleniy intensivnosti opticheskogo polya v oblastyakh in-terferentsionnoy kartiny, ogranichennykh geometricheskimi kharakteristikami fotopriemnykh ustroystv: sv-vo o gos. registratsii programmy dlya EVM 2017614764 Ros. Federatsiya. [Program for visualization and statistical processing of optical field intensity distributions in the areas of interference pattern limited by the geometric characteristics of photodetectors.] RF Certificate of software registration, no. 2017614764, 2017 (in Russian).

21. Miroshnichenko, I.P. Programma dlya korrektirovki rezul'tatov izmereniy intensivnosti opticheskogo polya interferentsionnoy kartiny: sv-o o gos. registratsii programmy dlya EVM 2017614900 Ros. Federatsiya. [Program for correcting the results of measuring intensity of the optical field of the interference pattern.] RF Certificate of software registration, no. 2017614900, 2017 (in Russian).

Поступила в редакцию 25.09.2017
Сдана в редакцию 25.09.2017
Запланирована в номер 30.10.2017

Received 25.09.2017
Submitted 25.09.2017
Scheduled in the issue 30.10.2017

***Об авторе*:**

Мирошниченко Игорь Павлович,
заведующий кафедрой «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000–0001–9450–2500
ipmir@rambler.ru

Author

Miroshnichenko, Igor P.,
head of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000–0001–9450–2500
ipmir@rambler.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631/635 10.23947/1992-5980-2017-17-4-44-49

Оптимизации профиля среза транспортирующего устройства от величины секундной подачи*

Т. П. Савостина[1], Саед Бакир Имад [2]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

[2]Алеппо университет, г. Алеппо, Сирия

Optimization of transporter slice profile on the second supply value***

T. P. Savostina[1], Saed Bakir Imad[2] **

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2]University of Aleppo, Aleppo, Syria

Введение: Работа посвящена проблеме неравномерности подачи хлебной массы на обмолот, что приводит к росту потерь зерна в процессе зерноуборочных работ. Целью данных исследований является выявление закономерностей влияния изменения секундной подачи на обмолот как по длине барабана, так и по ширине. В результате чего появляется возможность получения графиков оптимального профиля среза транспортирующего устройства, что обеспечивает равномерность подачи зерновой массы на начальных стадиях обмолота.

Материалы и методы. Приведены исследования равномерного распределения зерновой массы в процессе обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством по зонам в зависимости от изменения величины секундной подачи. Получение качественных показателей обмолота достигалось путем оптимизации профиля среза. Использовались полученные экспериментальные данные, обработка которых дала возможность определить оптимальный профиль среза.

Результаты исследования: По результатам экспериментов построены графики профиля среза транспортирующего устройства от различных величин секундной подачи (4–12 кг/с), получены уравнения этих прямых, построен усредненный профиль среза для всей группы кривых от величины подачи хлебной массы.

Обсуждение и заключения. В результате исследований профилей среза транспортирующего устройства от величины секундной подачи было выведено уравнение кривой среза для равномерной подачи хлебной массы на обмолот. Коэффициент достоверности аппроксимации показал высокие показатели точности аппроксимации.

Introduction. The paper discusses the problem of an uneven flow of the grain mass to the threshing which leads to the increased grain loss under the grain-harvesting process. The study purpose is to identify patterns of the effect of changing the second flow threshing both on the length of the drum, and on its width. This is resulting in the possibility of obtaining graphs of the optimal slice profile of the conveying device which ensures an even flow of the grain mass at the initial stages of threshing.

Materials and Methods. Our research is aimed at obtaining high qualitative indicators of the threshing process by the separating device. Studies on the equal-dimensional distribution of the grain mass under the threshing process by the tangential-axial separating device in the zones depending on the change in the second feed value are provided. Obtaining qualitative indicators of the thrashing was achieved through the slice profile optimization. The experimental data whose processing gave the opportunity to determine the optimal slice profile were used.

Research Results. The experimental results have provided background for graph plotting of the transporter cut profile on a variety of quantities of the used feed (4-12 kg/s). The resulting equations of these lines are obtained. The averaged slice profile for the entire group of curves on the grain mass feed value is developed.

Discussion and Conclusions. The studies of the transporter slice profiles on the second feed value have led to the derivation of the cut curve equation for the uniform grain mass flow to the threshing. The validity approximation coefficient has shown high levels of the approximation accuracy.

Ключевые слова: молотильно-сепарирующее устройство, подача хлебной массы, транспортирующее устройство, профиль, оптимизация среза, недомолот, сепарация, засоренность, влажность, равномерность.

Keywords: threshing and separating device, grain mass supply, transporter, profile, cut optimization, return, separation, infestation, humidity, uniformity.

Образец для цитирования:. Савостина, Т. П. Оптимизации профиля среза транспортирующего устройства от величины секундной подачи / Т. П. Савостина, Саед Бакир Имад // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 4. — С. 44–49.

For citation: T.P. Savostina, Saed Bakir Imad. Optimization of transporter slice profile on the second supply value. Vestnik of DSTU, 2017 vol. 17, no.4, pp. 44–49.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: kovtanya@yandex.ru, Imad12sb@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Необходимость повышения пропускной способности зерноуборочного комбайна объясняется желанием увеличить производительность и снизить потери зерна [1]. Ранее увеличение пропускной способности зерноуборочных комбайнов достигалось в результате улучшений отдельных технологических процессов молотильно-сепарирующих устройств. Дальнейшая модернизация для увеличения пропускной способности таких комбайнов возможна за счет интенсификации процессов отдельно взятых рабочих органов или создания новых, более совершенных методов и принципов обмолота и сепарации зернового вороха [2].

Снижение потерь и повреждений зерновых культур в процессе уборочных работ во многом зависят от потерь на отдельно взятых рабочих органах зерноуборочного комбайна, которые в значительной степени определяются от конструкции молотильно-сепарирующего устройства (МСУ) [3]. Актуальной задачей при снижении повреждений зерна является обеспечение равномерной подачи зерновой массы в процессе обмолота [4]. Чем равномернее движется хлебная масса по подбарабанью, тем равномернее происходят ударные воздействия на обмолачиваемую массу по длине всей площади МСУ [5,6].

Целью работы являлось получение высоких качественных показателей при обмолоте зерна на молотильно-сепарирующим устройстве. Проведено исследование равномерного распределения зерновой массы в процессе обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством по зонам и абсолютной засоренности зерновой массы в каждой отдельной зоне по ширине сепарирующего устройства.

Объектом исследования является зерноуборочный комбайн с молотильным барабаном и декой, выполненной по форме однополостного гиперболоида вращения. Основными рабочими органами и агрегатами комбайна являются: молотильно-сепарирующее устройство; молотильный барабан и дека; бичи; наклонная камера с активным делением потока хлебной массы, выполненная в виде диска; транспортер наклонной камеры и отбойный битер.

Результаты и обсуждение. Качественные показатели молотильного аппарата зависят от условий подачи хлебной массы. Рассмотрим основные процессы, происходящие в зазоре между барабаном и декой.

Большая часть зерна при оптимальной скорости подачи вымолачивается из хлебной массы на первых планках полубарабана [7]. Интенсивность вымолота по длине деки уменьшается. С ростом скорости подачи хлебной массы сепарация начинает изменяться по выпуклой кривой [8].

Для улучшения качества сепарации необходимо обеспечить вымолот в начале подбарабанья (рис.1). Битеры, установленные перед молотильным аппаратом, вымолачивают часть зерна, за счет чего увеличивается сепарация на первых планках деки. Для дек с различным распределением планок она может достигать 12,8–17,1 %.

Хлебная масса, для выравнивания толщины подаваемого в молотилку слоя, подается к барабану с нарастающей скоростью пятью битерами, установленными в приемной камере [9]. Такой способ подачи позволяет увеличить производительность комбайна на 10% [10].

Для определения профиля среза необходимо, чтобы количество хлебной массы на единицу длины молотильно-сепарирующего было постоянным:

$$\frac{\sum S}{\sum l} = \frac{\sum S_1}{l_1} = \frac{\sum S_2}{l_2} = \frac{\sum S_3}{l_3} = \frac{\sum S_4}{l_4} = \frac{\sum S_5}{l_5} = const \,, \qquad (1)$$

где $\sum l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 1000 мм$ — ширина молотильно-сепарирующего устройства; $\sum S = \sum S_1 + \sum S_2 + \sum S_3 + \sum S_4 + \sum S_5$ — суммарная абсолютная сепарация и засоренность.

Для определения абсолютной суммарной сепарации (ΣS) необходимо просуммировать показатели абсолютных суммарных сепараций и засоренностей. В нашем случае использовались технологические показатели секундной подачи в диапазоне от 4 до 12 кг/сек. Величина абсолютной суммарной сепарации складывается из сумм абсолютных зональных значений в каждой из пяти ячеек. В таблице 1 представлены абсолютные значения сепарации по зонам и ячейкам от изменения величины секундой подачи, а также из условия (1) определены величины констант (const), значения которых показывают количество зерновой массы, приходящейся на единицу длины молотильно-сепарирующего устройства.

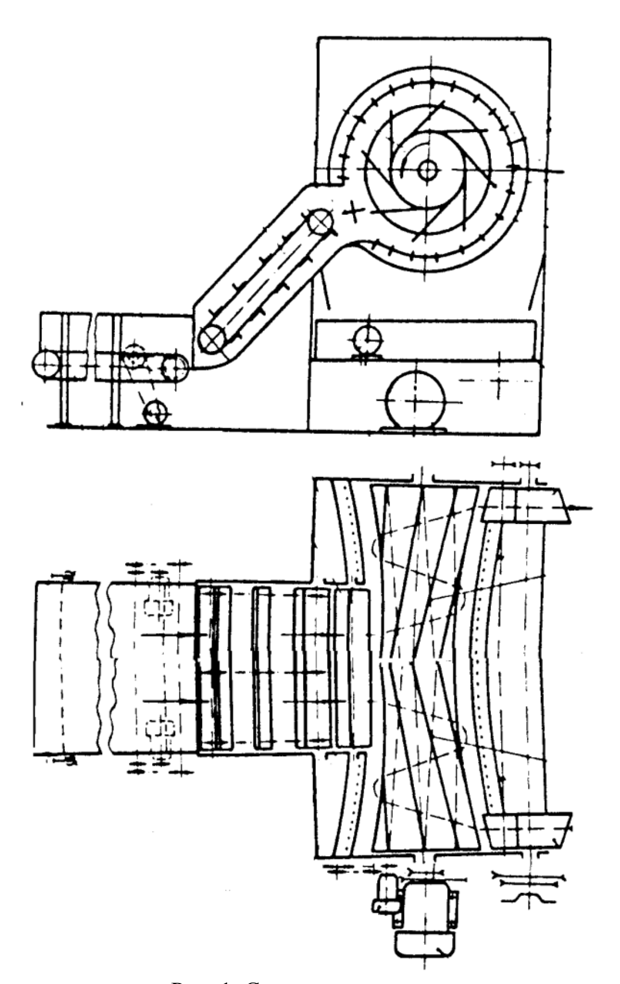


Рис. 1. Схема установки

Fig. 1. Installation diagram

Таблица 1

Table 1

Абсолютные суммарные значения сепарации по зонам и ячейкам

Absolute sum values of separation on zones and cells

Величина подачи	$\sum S_1$	$\sum S_2$	$\sum S_3$	$\sum S_4$	$\sum S_5$	$\sum S$	const
q=4 кг/с	4,213	2,5579	2,8203	3,1411	6,0567	18,789	0,01879
q=6 кг/с	5,2142	3,1015	2,6362	2,8795	5,0007	18,8616	0,01886
q=8 кг/с	6,5285	3,6571	3,1144	3,3241	5,0535	21,7372	0,02174
q=10 кг/с	8,132	4,445	3,5755	3,5156	5,7253	25,3934	0,02539
q=12 кг/с	9,7221	4.9806	3,9298	3,8743	6,0956	28,6052	0,02861

Для определения единицы длины для каждой ячейки необходимо выполнение следующего условия:

$$1_i = \frac{\Sigma S_i}{const}, \tag{2}$$

где ΣS_i — величина абсолютной суммарной сепарации в i-ой ячейке; const — количество зерновой массы, приходящейся на единицу длины МСУ при заданной величине секундной подачи. Расчеты величин единиц длины для каждой ячейки от изменения величины секундой подачи приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Величина единицы длины каждой ячейки

Length unit magnitude of each cell

Величина подачи	l_1, мм	l_2, мм	l_3, мм	l_4, мм	l_5, мм	Σl, мм
q=4 кг/с	224,227	136,14	150,1	167,18	322,35	1000
q=6 кг/с	276,445	164,43	139,77	152,66	265,13	1000
q=8 кг/с	300,338	168,24	143,28	152,92	232,48	1000
q=10 кг/с	320,241	175,05	140,8	138,45	225,46	1000
q=12 кг/с	339,872	174,12	137,38	135,44	213,09	1000

Значения l_i откладываем на графике в соответствующей *i*-ой ячейке длины барабана *L*. Полученные профили среза аппроксимируются (рис. 2).

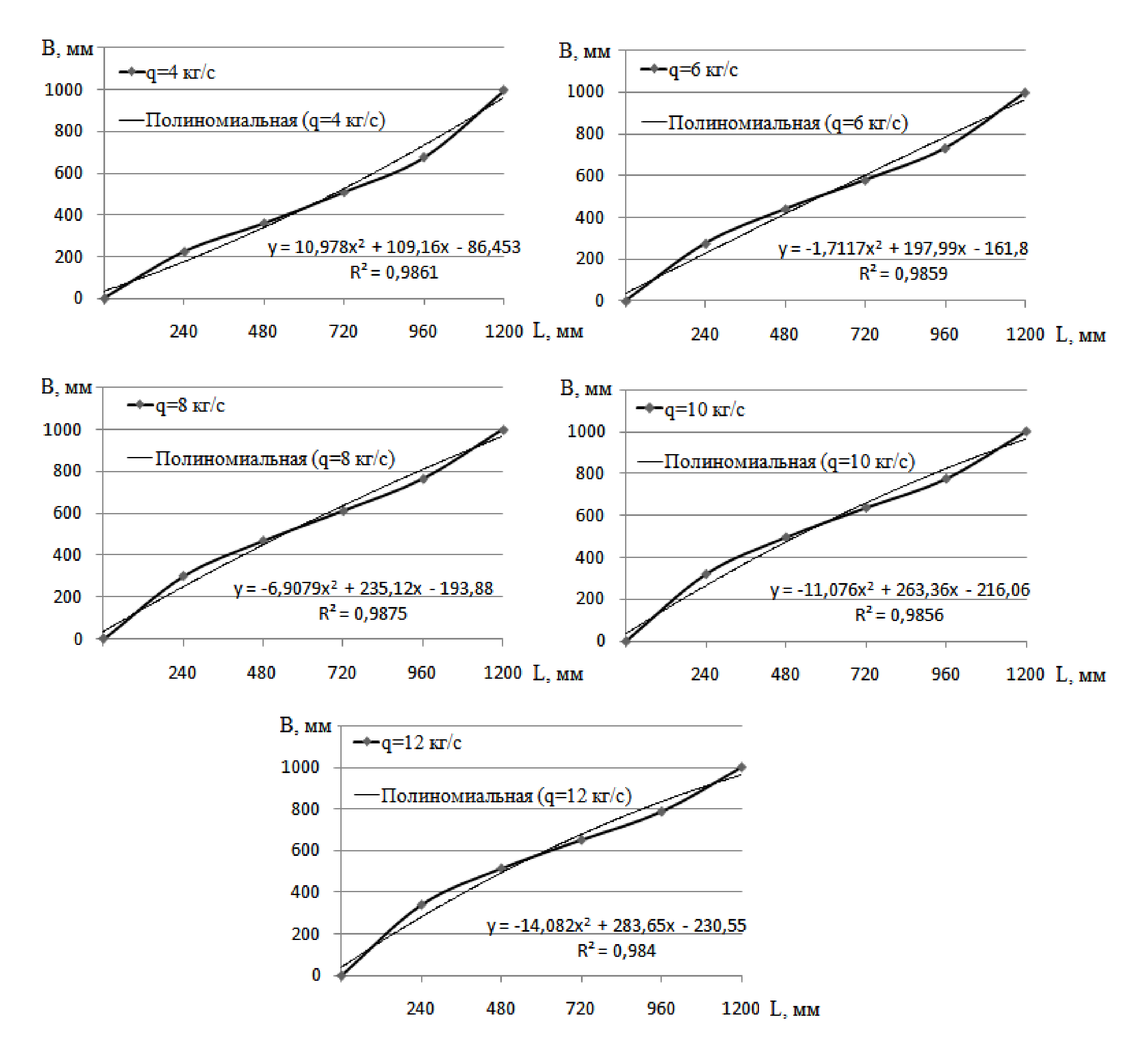


Рис. 2. Профили среза в зависимости от секундной подачи

Fig. 2. Slice profiles depending on the used feed

Так как формы кривых профиля идентичны (рис. 2), построим усредненную кривую для всей группы кривых (рис. 3).

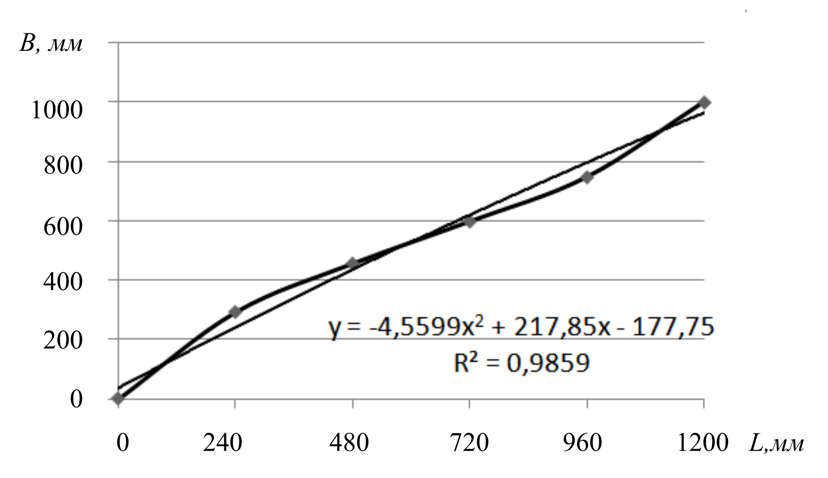


Рис. 3. Усредненный профиль среза от секундной подачи

Fig. 3. Averaged slice profile on the second feed

Выводы.

1. Из графиков профиля среза на рис. 2 видно, что при изменении величины секундной подачи с 4 до 12 кг/с кривые среза имеют схожий профиль.
2. Коэффициент достоверности аппроксимации R^2 показывает степень соответствия трендовой модели исходным данным. На всех графиках аппроксимации профиля среза коэффициент достоверности близок к 1, что говорит о точности модели.
3. Усредненный профиль среза (рис. 3) так же имеет коэффициент достоверности аппроксимации близкий к 1 и имеет схожий профиль кривой, как и при различных величинах секундной подачи.

Библиографический список

1. Lapen, D.-R., et al. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research. Soil & Tillage Research. – 2003. – no. 58. – pp. 193-206.

2. Salloum, W. Design of Penetrometer Cone for Measuring Soil Penetration Resistance and Determine Soil Porosity / W. Salloum, Bahlawan H. // Research Journal of Aleppo University. – 2009. – №. 76. – pp. 40–57.

3. Антибас, И. Р. Исследование процесса обмолота тангенциально-аксиальным сепарирующим устройством в зависимости от распределения зерновой массы по зонам / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2016. — № 23. — С. 87–91.

4. Дьяченко, А. Г. Обеспечение равномерности зерновой массы при обмолоте тангенциально-аксиальным молотильно-сепарирующим устройством / А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й междунар. науч.-практ. конф. В рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону. — 2017. — С.41–43.

5. Антибас, И. Р. Влияние секундной подачи на процесс обмолота тангенциально-аксиальным молотильно-сепарирующим устройством / И. Р. Антибас, Т. П. Савостина // Научное обозрение. — 2017.— № 3. — С. 47–51.

6. Антибас, И. Р. Влияние параметров молотильно-сепарирующего устройства на обмолот / И. Р. Антибас , Т. П. Савостина , Б. И. Саед // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017 — Т. 17. — № 2(89). — С. 108–115.

7. Kharmanda, G. Reliability-based design optimization strategy for soil tillage equipment considering soil parameter uncertainty / G. Kharmanda, I. Antypas // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016.— Т. 16.— № 2 (85). — С. 136–147.

8. Kharmanda, G. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design / G. Kharmanda, I. Antypas // Вестник Донского гос. техн. ун-та. —2015. —Т. 15. — № 2 (81). — С. 22–31.

9. Антибас, И. Р. Технические параметры модифицированной сеялки для высева зерновых культур в тяжёлые по механическому составу почвы / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15. — № 3 (82). — С.81–88.

10. Antibas, I.R. Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip / I.R. Antibas, A.G. Dyachenko // International Journal of Environmental and Science Education. — 2016. — Т. 11. — № 18. — P. 10941-10950.

References

1. Lapen, D.-R., et al. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research. Soil & Tillage Research, 2003, no. 58, pp. 193–206.

2. Salloum, W., Bahlawan, H. Design of Penetrometer Cone for Measuring Soil Penetration Resistance and Determine Soil Porosity. Research Journal of Aleppo University, 2009, no. 76, pp. 40–57.

3. Antypas, I.R., Dyachenko, A.G., Savostina, T.P. Issledovanie protsessa obmolota tangentsial'no-aksial'nym separiruyushchim ustroystvom v zavisimosti ot raspredeleniya zernovoy massy po zonam. [Research of the threshing process with tangential-axial breaking unit in dependence of grain mass zone division.] Science Review, 2016, no. 23, pp. 87–91 (in Russian).

4. Dyachenko, A.G., Savostina, T.P. Obespechenie ravnomernosti zernovoy massy pri obmolote tangentsial'no-aksial'nym molotil'no-separiruyushchim ustroystvom. [Providing uniformity of grain mass under threshing by tangential-axial threshing-separating device.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 10-y Mezhdunar. yubileynoy nauch.-prakt. konf. v ramkakh 20-y Mezh-dunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2017». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 10th Int. Jubilee Sci.-Pract. Conf. within framework of the 20th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2017”.] Rostov-on-Don, 2017, pp. 41–43 (in Russian).

5. Antypas, I.R., Savostina, T.P. Vliyanie sekundnoy podachi na protsess obmolota tangentsial'no-aksial'nym molotil-'no-separiruyushchim ustroystvom. [Impact of second feed for the threshing process of the tangential-axial breaking unit.] Science Review, 2017, no. 3, pp. 47–51 (in Russian).

6. Antypas, I.R., Savostina, T.P., Saed, B.I. Vliyanie parametrov molotil'no-separiruyushchego ustroystva na obmolot. [Effect of threshing-separating device parameters on threshing.] Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no. 2(89), pp. 108–115 (in Russian).

7. Kharmanda, G., Antypas, I. Reliability-based design optimization strategy for soil tillage equipment considering soil parameter uncertainty. Vestnik of DSTY, 2016, vol. 16, no. 2 (85), pp. 136–147.

8. Kharmanda, G., Antypas, I. Integration of Reliability Concept into Soil Tillage Machine Design. Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 2 (81), pp. 22–31.

9. Antypas, I.R., Dyachenko, A.G. Tekhnicheskie parametry modifitsirovannoy seyalki dlya vyseva zernovykh kul'tur v tyazhelye po mekhanicheskomu sostavu pochvy. [Technical parameters of modified seed drill for sowing grain crops in heavy soils.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 3 (82), pp. 81–88 (in Russian).

10. Antibas, I.R., Dyachenko, A.G. Evaluation of soil force of resistance to penetration with the use of new design of penetrometer's probe tip. International Journal of Environmental and Science Education, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 10941–10950.

Поступила в редакцию 22.08.2017
Сдана в редакцию 23.08.2017
Запланирована в номер 05.10.2017

Received 22.08.2017
Submitted 23.08.2017
Scheduled in the issue 05.10.2017

Об авторах:

Савостина Татьяна Петровна,
ассистент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5550-7624
kovtanya@yandex.ru

Саед Бакир Имад,
доцент кафедры «Сельскохозяйственное машиностроение» Университета Алеппо (Сирия, Алеппо), доктор технических наук, доцент
Imad12sb@gmail.com

Authors:

Savostina, Tatyana P.,
teaching assistant of the Machine Design Principles, Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5550-7624
kovtanya@yandex.ru

Saed Bakir Imad,
associate professor of the Agricultural Machinery Engineering Department University of Aleppo (Syria, University of Aleppo),
Imad12sb@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.182.12 10.23947/1992-5980-2017-17-4-50-60

Совершенствование методов и устройств контроля содержания органических примесей в теплоносителе на ТЭС и ТЭЦ*

В. Н. Щербаков[1], М. С. Полешкин[2], В. И. Антоненко[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Improvement of methods and devices for organic impurities control in the coolant at TPP and CHP ***

V. N. Shcherbakov[1], M. S. Poleshkin[2], V. I. Antonenko[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассматриваются вопросы повышения надежности исследования поведения органических примесей теплоносителя и оперативного контроля их концентраций на ТЭС и ТЭЦ. Выполнен анализ возможных причин появления органических веществ в питательной, котловой воде и в паре энергоустановок. Изучено поведение характерных примесей в жидкой и паровой фазах при высоких температурах.

Материалы и методы. Выполнен анализ существующих методов и устройств контроля содержания органических примесей теплоносителя в контурах ТЭС и ТЭЦ.

Результаты исследования. Предложены способы совершенствования существующих методов и устройств контроля с учетом их достоинств и недостатков. При контроле процесса термолиза потенциально кислых органических примесей в жидкой и паровой фазах рекомендовано использовать усовершенствованную авторами установку Всероссийского технологического института. При этом кондуктометрический контроль процесса термолиза в паровой фазе при различных температурах на прямоточных котлах следует вести по показаниям кондуктометрического охлаждаемого датчика, размещенного в контролируемом паре. Для упрощения исследования процесса перехода органических примесей из кипящей воды в насыщенный пар предложен метод одновременного измерения удельной электропроводности воды и конденсата пара в охлаждаемом кондуктометрическом датчике. Все это позволит получать объективную информацию о поведении органических примесей в пароводяном тракте энергоблоков, о ходе процесса термолиза и об источниках поступления опасных примесей в котел. Кроме того, с учетом результатов данной работы могут быть расширены возможности исследования поведения потенциально кислых веществ и контроля их содержания в воде и в паре.

Обсуждение и заключения. Усовершенствованные устройства контроля могут быть использованы в качестве дополнения к существующим для совместной работы в системах химико-технологического мониторинга энергоблоков. Предложен способ совершенствования систем регулирования режимов работы испарительных установок при термической очистке вод от органических примесей — главным образом с целью

Introduction. Issues of increasing the reliability of investigating the coolant's organic impurities behavior and the operational control of their concentrations at TPPs and CHPs are considered. Possible causes of the organics occurrence in the boiler feedwater and in the steam of the power plants are analyzed. The behavior of typical impurities in the liquid and vapor phases at high temperatures is studied.

Materials and Methods. The analysis of the existing methods and devices for the organic impurities control in the coolant of the TPP and CHP circuits is conducted.

Research Results. Taking into account the advantages and disadvantages of the existing techniques and monitoring devices, methods of their improvement are proposed. When monitoring the thermolysis process of the potentially acidic organic impurities in the liquid and vapor phases, it is recommended to use the installation of the All-Russian Technological Institute improved by the authors. In this case, the conductometric control of the thermolysis process in the vapor phase at different temperatures on the concurrent boilers should be carried out according to the readings of the conductometric cooled sensor placed in the controlled steam. A technique for the simultaneous measurement of the specific electric conductivity of water and steam condensate in the coolable conductivity sensor is proposed to simplify the study of the transition of organic impurities from boiling water to saturated steam. All this will allow obtaining the objective information about the organic impurities behavior in the water-steam circuit of the power units, the thermolysis process, and the sources of hazardous impurities flow into the boiler. Besides, taking into account the results of this work, the researchability of the behavior of potentially acidic substances and monitoring of their content in water and steam can be enhanced.

Discussion and Conclusions. The advanced control devices can be used as a supplement to the existing ones for joint operation in the chemical and technological monitoring systems of the power plants. A method for improving the operating modes control systems of the evaporator plants under the thermal treatment of water from organic impurities, mainly to reduce the content of potential-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: vladnik48@aaanet.ru, poleshkin.maks@gmail.com, viantonen@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

снижения содержания потенциально кислых веществ в паре и конденсате установок. Для этого рекомендовано использовать ранее разработанные авторами датчики контроля.

ly acidic substances in steam and condensate of the plants, is proposed. For this purpose, it is recommended to use the control sensors previously developed by the authors.

Ключевые слова: качество теплоносителя, органические примеси, поведение, методы контроля, анализ, совершенствование, ТЭС, ТЭЦ.

Keywords: coolant quality, organic impurities, behavior, monitoring methods, analysis, improvement, TPP, CHP.

Образец для цитирования: Щербаков, В. Н. Совершенствование методов и устройств контроля содержания органических примесей в теплоносителе на ТЭС и ТЭЦ / В. Н. Щербаков, М. С. Полешкин, В. И. Антоненко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 50–60.

For citation: V.N. Shcherbakov, M.S. Poleshkin, V.I. Antonenko. Improvement of methods and devices for organic impurities control in the coolant at TPP and CHP. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 50–60.

Введение. Технико-экономические показатели ТЭС и ТЭЦ в значительной мере зависят от степени чистоты воды и пара, определяющей качество теплоносителя, в котором наряду с минеральными присутствуют органические примеси (ОП). При высоких температурах *T* часть органических соединений разлагается с образованием кислот и их солей, уменьшая значение *pH* питательной, котловой воды и пара. Поэтому с появлением ОП в теплоносителе происходит усиление коррозионных процессов в элементах проточной части пароводяного тракта котельных агрегатов и турбин [1, 2]. При взаимодействии кислот с ионами железа на внутренних поверхностях теплосилового оборудования могут появляться отложения органических соединений. Количество коррозионно-опасных соединений зависит от вида примесей. При высоких параметрах состояния поведение органических соединений изучено не так полно, как неорганических [2]. В настоящее время за рубежом при контроле количества ОП в контурах энергоблоков ориентируются на количество общего неорганического и общего органического углерода [3, 4]. На отечественных электростанциях широкое применение приборов для измерения содержания общего органического углерода *TOC* (*Total Organic Carbon*) ограничивается их высокой стоимостью [5]. В работах [4, 6], выполненных в лабораторных условиях и на действующих ТЭС и ТЭЦ, для контроля содержания ОП предлагаются менее дорогостоящие методы, основанные на результатах кондуктометрических и оптических измерений, связанных с величиной показателя *TOC*. Однако для рациональной организации и ведения водно-химических режимов (ВХР) энергоблоков необходимы данные о поведении ОП в пароводяном тракте энергоблоков и характере молекулярных изменений, происходящих в жидкой и паровой фазах теплоносителя. Перечисленные выше методы такой информации не дают.

Целью настоящей работы является повышение надежности методов исследования поведения ОП теплоносителя и средств оперативного контроля их концентраций на ТЭС и ТЭЦ. Этой цели служат предлагаемые усовершенствованные методики исследования поведения ОП, основанные на анализе:
— возможных причин появления ОП в питательной, котловой воде и в паре;
— поведения ОП в пароводяном тракте;
— методов и устройств контроля содержания ОП в жидкой и паровой фазах теплоносителя.

Кроме того, с учетом поставленной цели рекомендованы средства оперативного контроля концентраций ОП.

Источники ОП. Источниками поступления органических веществ в питательную воду энергетических котлов являются:
— основные конденсаты;
— добавочная вода из бака запаса конденсата;
— возвратные конденсаты ТЭЦ;
— органические реагенты для коррекционной обработки воды, консервации и отмывки теплосилового оборудования [2, 4].

В основной конденсат ОП поступают с нефтепродуктами, частицами ионитов блочных обессоливающих установок (БОУ), с присосами охлаждающей воды конденсаторов турбин и сетевой воды в сетевых подогревателях. Природные воды, использующиеся для охлаждения пара в конденсаторах турбин, могут содержать ОП техногенного происхождения, связанные со сбросом сточных вод предприятий, и примеси, вымываемые из почв [2]. Основным компонентом примесей природных вод являются гумусовые вещества, содержащие разнообразные ароматические, фенольные и карбоксильные группы. Гуминовые кислоты могут образовывать устойчивые комплексные соединения, которые не задерживаются системами очистки конденсата и добавочной воды [2, 7]. При хлорировании охлаждающей воды могут образовываться термически неустойчивые неионогенные хлорорганические соединения (хлороформ, тэтрахлорэтилен и др.) [1, 7]. При работе водоподготовительного оборудования из ионитов конденсатоочистки отечественного производства вымываются такие органические примеси, как дивинилбензол (мономер), алкилбензосульфат, полиэтиэтиламины, этилхлоргидрин, формальдегид и др. [2, 3]. Из катионитов в фильтрат попадают фториды, хлори-

ды, сульфаты, ацетаты и формиаты [8]. При водоподготовке на ТЭС и ТЭЦ в процессах коагуляции используют полиэлектролиты органического происхождения (полиаминовые, полиакриловые, полималеиновые кислоты и др.), которые могут попадать в пароводяной тракт [2].

Поведение ОП при высоких температурах. С повышением температуры органические соединения в жидкой фазе подвергаются термолизу и гидролизу. Часть образующихся низкомолекулярных соединений повышает коррозионную агрессивность теплоносителя [2, 3, 4]. На основании экспериментальных исследований установлено, что при разложении ОП, содержащихся в природной воде, образуются ацетаты, формиаты, гликоляты, пропионаты, значительно возрастает концентрация хлоридов [9]. В паровой фазе появляются H_2 и CO_2. При наличии присосов охлаждающей хлорированной воды в конденсаторах турбин с повышением температуры идет термолиз хлорорганических соединений (например, хлороформа) с образованием соляной и муравьиной кислот [10]. Муравьиная кислота полностью разлагается при $T = 558K$ с образованием CO_2 и H_2 [2]. Ранее авторы представленной работы совместно со Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) выполнили экспериментальное исследование термолиза в водной среде хлорорганических примесей возвратных конденсатов ТЭЦ дихлорэтана $C_2H_4Cl_2$ и четыреххлористого углерода CCl_4 [11]. Термолиз $C_2H_4Cl_2$ и CCl_4 начинался при 413K и быстро заканчивался в интервале 413–473К с образованием соляной кислоты (рис. 1).

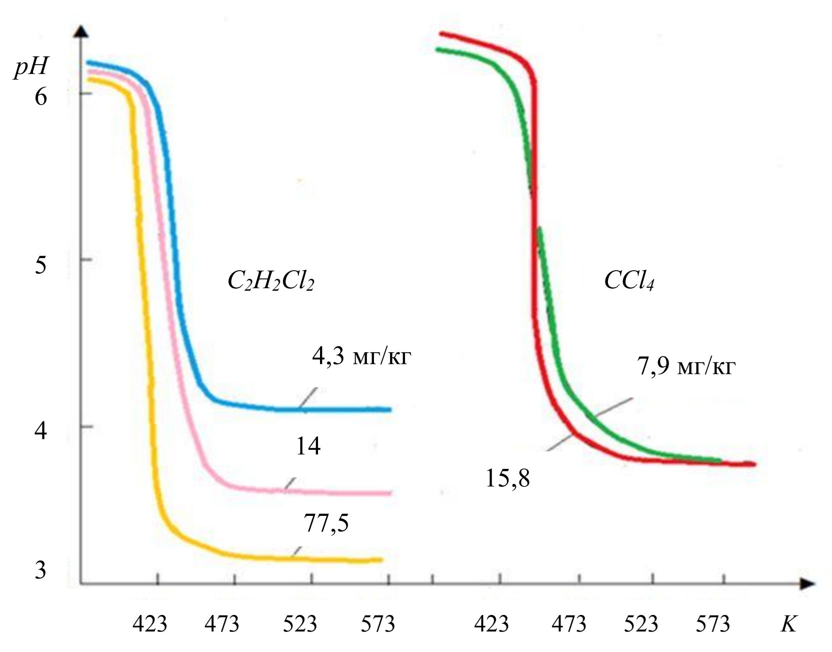


Рис. 1. Изменение значений *pH* растворов $C_2H_4Cl_2$ и CCl_4 от температуры на линии насыщения

Fig. 1. Change in pH values of C2H4Cl2 and CCl4 solutions on the temperature at saturation line

Продукты разложения высокомолекулярных органических соединений, образующиеся в высокотемпературной зоне пароводяного тракта, являются наиболее коррозионно-агрессивными [2]. В результате экспериментальных исследований, выполненных в ВТИ В. Н. Ходыревым с сотрудниками [12], установлено, что процесс термолиза органических соединений активизируется с увеличением содержания кислорода в воде. При термолизе гумусов в питательной воде котлов появляются муравьиная, молочная, уксусная (или оксиуксусная) кислоты в примерном соотношении 2:1:1.

В перегретом паре появляется уксусная кислота в количестве намного большем, чем в питательной воде. При попадании продуктов пептизации и пылевидных фракций ионитов в пароводяном тракте ТЭС появляются минеральные кислоты. Летучие органические вещества гумусового происхождения и продукты неполной полимеризации стирола и дивинилбензола не являются потенциально кислыми веществами (ПКВ), в результате термолиза которых могут образовываться кислоты. Анионы органических кислот беспрепятственно проходят через фильтры блочных обессоливающих установок в виде комплексов с ионами железа, появляющимися на поверхности сильнокислотного катионита, находящегося в *H*-форме. В контурах ТЭС с барабанными котлами при $P = 15{,}5$ МПа в питательной, котловой, добавочной воде, в насыщенном, перегретом паре и в турбинном конденсате авторы [13] обнаружили хлороформ, ароматические углеводороды с молекулярной массой 80–120 условных единиц (бензол, толуол и др.), фенол, двухосновные фенолы, органические основания, органические кислоты (уксусная, муравьиная и др.) и нейтральные соединения. Большая часть ОП относится к летучим соединениям, которые хорошо переходят из воды в пар. Например, при $P = 15{,}5$ МПа видимые коэффициенты распределения $K_p^{вид}$ таких соединений, как хлороформ, хлористый метилен, дихлорметан, органические основания, нейтральные соединения, ароматические углеводороды равны 1,58; 2,82; 1,33;

0,43; 0,68 и 0,56 соответственно [2]. Присутствие органических соединений в воде приводит к увеличению $К_р^{вид}$ коррозионно-агрессивных хлоридов и сульфатов [2, 7]. При P = 10 МПа в условиях бескоррекционного ВХР $К_р^{вид}$ хлоридов возрастает на 3–4 порядка, а у сульфатов — в 10 раз в присутствии CH_3COOH [7, 14]. При гидразино-аммиачном ВХР наблюдается увеличение $К_р^{вид}$ для хлоридов и сульфатов [2]. Известно, что в зоне фазового перехода от перегретого пара к влажному в турбинах образуются первичный конденсат и жидкие пленки, в которых концентрируются примеси. Это является причиной коррозионных повреждений лопаток и дисков турбин [1, 2, 4]. Концентрация ацетатов и формиатов в первичном конденсате и в жидких пленках в сотни раз превышает их концентрацию в паре [1, 2]. При аммиачном и кислородном ВХР *pH* в жидких пленках значительно уменьшается. Возрастает концентрация сульфатов и хлоридов [15]. В работе [16] при загрязнении теплоносителя органическими примесями вследствие попадания частиц ионитов в добавочную воду в паре и в первичном конденсате была обнаружена смесь органических кислот с наибольшим количеством уксусной кислоты.

Устройства и методы контроля. На многих ТЭС и ТЭЦ в России тепломеханическое оборудование эксплуатируется много лет и находится в изношенном состоянии [1]. В этих условиях особая роль отводится решению задач, связанных с повышением надежности парогенераторов и турбоустановок. Учеными установлено, что до 60 % случаев выхода из строя оборудования связано с нарушением ВХР [17]. При ведении ВХР решается задача обеспечения качества теплоносителя в соответствии с нормируемыми показателями. Для своевременной оценки и корректировки показателей ВХР в последние годы на ТЭС и ТЭЦ внедряются автоматические системы химико-технологического мониторинга (СХТМ) [1], эффективность которых зависит от адекватности методов и приборов контроля качества теплоносителя. При оперативном автоматическом контроле содержания растворенных неорганических примесей в воде и в паре учитываются показания *pH*-метров, кондуктометров и иономеров [18]. Контроль концентрации ОП в жидкой и паровой фазах сопряжен с значительными трудностями [6]. Показатель «окисляемость» не позволяет судить о составе и свойствах ОП. Использование показателя *TOC* не дает информации о свойствах ОП и поэтому не решает в полной мере проблемы контроля процессов водоподготовки и корректировки ВХР. Один блочный комплект анализаторов *TOC* сопоставим по стоимости со всей СХТМ энергоблока [5]. В 2009 году в ОАО «ВТИ» издан стандарт организации СТО ВТИ — 2009 [19], в котором учтено развитие мембранных технологий очистки воды и внедрение полиаминов для обеспечения ВХР. В нормы качества воды введен показатель *TOC*. В питательной воде котлов с естественной циркуляцией, котлов — утилизаторов парогазовых установок и прямоточных котлов содержание ОП ограничивается значениями *TOC* 200, 100 и 100 мкг/дм^3, что соответствует нормам, принятым в энергосистемах США, ФРГ и других стран [20, 21].

Широко распространены анализаторы *TOC*, в которых используется ультрафиолетовое окисление ОП, находящихся в воде, с последующим измерением удельной электропроводности χ воды до и после окисления. Такой принцип действия и у отечественного анализатора *TOC* «*АТОС*-200*S*», рекомендованного к применению на станциях в соответствии с стандартом СТО ВТИ — 2009.

В своих работах Н. А. Белоконова [6] измеряла величину светопропускания T_λ водных растворов, содержащих ОП природных вод, в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Была обнаружена обратно пропорциональная зависимость между значениями *TOC* и T_λ. Автоматические спектрофотометры являются относительно недорогими и простыми в использовании приборами. Следует отметить, что разные органические соединения имеют разные значения T_λ при одинаковом содержании органического углерода в водных растворах. Спектрофотометрический метод не является универсальным. Для получения обессоленной воды с минимальным количеством ОП Н. А. Белоконова предлагает следующее:

— определять содержание *TOC* в исходной воде в разные периоды года при помощи «базового» метода определения *TOC* на приборе-анализаторе и оценивать эффективность химической водоочистки (ХВО) по уменьшению *TOC*;

— определять количественное соотношение между величинами *TOC* и T_λ;

— для непрерывного оперативного контроля качества обессоленной воды и управления процессом водоподготовки использовать приборы автоматического спектрофотометрического контроля.

Существует расчетный метод определения концентрации ПКВ в воде прямоточных котлов в пересчете на уксусную кислоту ($C_{ук}$) [4], основанный на измерении χ *H*-катионированной пробы питательной воды и конденсата острого пара [4]. Метод базируется на предположении, что наиболее вероятным продуктом термолиза ПКВ является уксусная кислота [4, 7, 10, 22]. Однако при таком контроле невозможно судить о происхождении ПКВ, их природе, характере молекулярных изменений, происходивших в пароводяном тракте энергоблока (как было отмечено выше), а также о причинах изменения величины $C_{ук}$ и конкретном месте попадания ПКВ в пароводяной тракт.

С целью определения количественного показателя содержания ОП в пароводяном тракте и мест проникновения ОП авторы [23] предложили метод контроля содержания коррозионно-опасных ОП по величине отношения $\chi_{ОС} / \chi_{ПВ}$, где $\chi_{ОС}$ и $\chi_{ПВ}$ — удельная электропроводность проб острого пара и питательной воды. Дополнительно определяются отношения $\chi t_2 / \chi t_1$ значений удельной электропроводности проб на промежуточных участках пароводяного

тракта, где χt_2 и χt_1 — удельная электропроводность пробы в конце и в начале участка соответственно. Изменение χ контролируется в температурных диапазонах: 303–433 *К*; 433–553 *К*; 553–713 *К*; 713–818 *К*; 573–818 *К*. На испарительных участках котла отношение $\chi t_2 / \chi t_1$ не должно быть более 1,3, а на пароперегревательных участках — более 1,15. Указанные диапазоны температур соответствуют условиям работы соответствующего оборудования пароводяного тракта на ТЭС. Авторы [23] полагают, что контроль отношений электропроводностей проб воды и пара на отдельных участках пароводяного тракта позволяет определять возможные источники проникновения в тракт ОП и принимать своевременные меры по их полной или частичной ликвидации. Следует отметить, что при ведении ВХР в воде и в паре может присутствовать аммиак NH_3 и оказывать влияние на удельную электропроводность χ проб воды и пара [4]. В работе [4] отмечено, что на отечественных электростанциях предпринимаются попытки оценки количества ПКВ на основании результатов измерения удельной электропроводности и *pH* в питательной воде и паре прямоточных котлов [24, 25]. Присутствующие в воде примеси оказывают многофакторное влияние на χ и *pH*, поэтому такой метод оценки является малоинформативным [4].

В ВТИ разработана конструкция установки, предназначенной для термического разложения органических примесей возвратных конденсатов до попадания их в питательную воду котельных агрегатов [26]. Установка монтируется на линии возвратных конденсатов и в случае появления кислых продуктов термолиза с недопустимым значением *pH* потоки конденсата сбрасываются в резервные емкости для дальнейшей химической обработки. Преимущество этого метода контроля ПКВ заключается в том, что конструкцией установки предусмотрено моделирование условий термолиза органических примесей в жидкой фазе — в питательной воде, поступающей в котел при реальных температурах, существующих в котле, и в течение времени, равного времени пребывания в котле рассматриваемого объема жидкой фазы (480–900 с). Принципиальная схема установки, успешно прошедшей испытания на Нижнекамской ТЭЦ-1 и Ефремовской ТЭЦ, представлена на рис. 2.

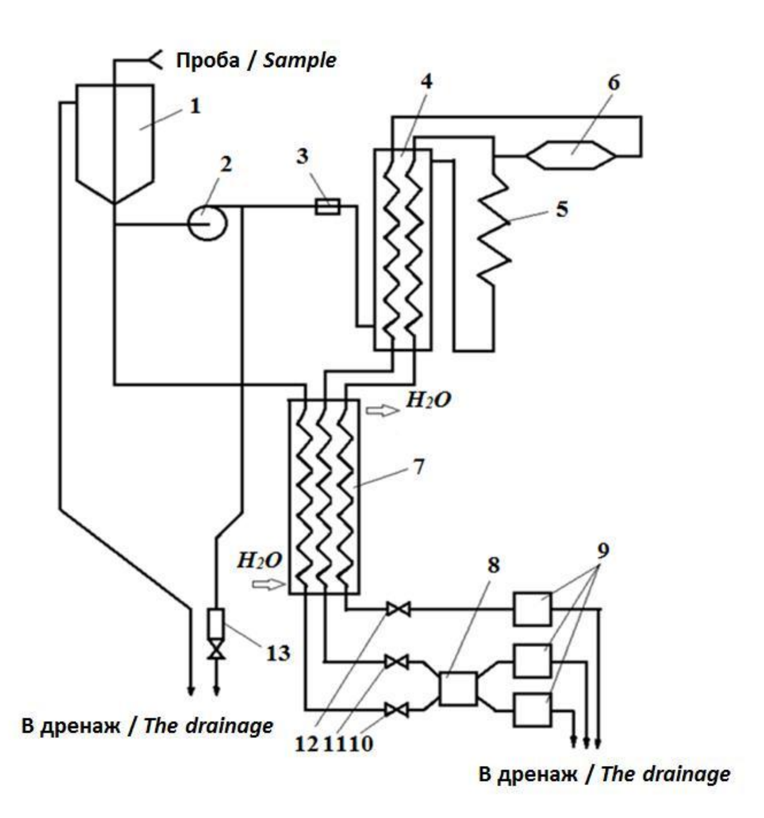


Рис. 2. Схема установки ВТИ для определения потенциально кислых примесей в возвратных конденсатах ТЭЦ

Fig. 2. Diagram of All-Russian Technological Institute installation for determination of potentially acidic impurities in return condensates of CHP

Возвратный конденсат из линии непрерывно подается в напорный бак 1. Из бака 1 при помощи плунжерного насоса-дозатора 2 через фильтр-дроссель 3, уменьшающий пульсации давления, конденсат подается под давлением 20 МПа в теплообменник 4 и нагревается теплом уходящих потоков до 473 *К*. Из теплообменника 4 конденсат направляется в трубку-нагреватель 5, по стенкам которой проходит электрический ток. На выходе из трубки 5 установлены две термопары — датчики системы контроля и регулирования температуры, благодаря чему температура конденсата равна температуре в котле. На выходе из нагревателя 5 поток конденсата делится на два: один направляется по линии «быстрого реагирования» в теплообменник 4, а второй — в реакционный сосуд 6. В реакционном сосуде 6 за счет увеличения площади поперечного сечения скорость потока уменьшается, что обеспечивает необходимую длительность воздействия высокой температуры на ПКВ. Из теплообменника 4 потоки линии «быстрого реагирова-

ния» и реакционного сосуда 6 направляются в теплообменник 7, где охлаждаются до 298 *K*. Потоки из бака 1 и реакционного сосуда 6 направляются из теплообменника 7 в измерительные ячейки дифференциального кондуктометра 8 и *pH*-метров 9. Поток из линии «быстрого реагирования» направляется через теплообменник 7 в измерительную ячейку *pH*-метра 9. Регулирование расхода конденсата на выходе из установки осуществляется при помощи задвижек 10, 11, 12. За насосом установлен клапан-регулятор 13, предохраняющий систему от превышения давления за счет удаления части пробы в дренаж. Линия «быстрого реагирования» позволяет быстро получать информацию о появлении ПКВ, когда термолиз еще не закончился. Дифференциальный кондуктометр 8 измеряет разность χ конденсата в двух линиях. В одной из них (в линии сравнения) конденсат не нагревается, а в другой проходит термическую обработку в нагревателе 5 и реакционном сосуде 6. Когда термолиз ПКВ идет с образованием NH_3, *pH* пробы увеличивается, что снижает эффективность контроля процесса термолиза по показаниям *pH*-метра. В этом случае контроль осуществляют по показаниям дифференциального кондуктометра 8. Давление и температура потока поддерживаются на установке в автоматическом режиме. Конструкция установки обеспечивает возможность получения экспериментальных данных о константах термолиза различных органических соединений в водных средах и об особенностях термолиза смесей органических веществ в водной среде. За время эксплуатации установки были обнаружены некоторые недостатки в ее конструкции. На долю насоса-дозатора приходилось наибольшее число остановов, связанных с течью сальников и ухудшением работы клапанов. Отложения железа препятствовали нормальной работе дросселя и выходных регулирующих задвижек, поэтому раз в две недели их чистили. Установка оказалась достаточно энергоемкой (1,5–2 кВт).

Совершенствование методов и устройств. На основании выполненного анализа представляется рациональным решение задачи эффективного непрерывного контроля концентрации ПКВ в возвратных конденсатах ТЭЦ и в питательной воде котлов на ТЭС и ТЭЦ путем совершенствования описанной выше установки ВТИ. С этой целью авторами разработана новая конструкция насоса высокого давления [27], в котором нет электродвигателя, редуктора, плунжера и сальников. Такой насос позволяет намного (на 1–1,2 кВт) снизить затраты электроэнергии, стоимость, габариты установки и повысить ее надежность. Фильтрация механических примесей улучшается за счет применения сменных пористых и электромагнитных фильтров. Снижение энергопотребления возможно и за счет уменьшения расхода анализируемой жидкости через установку. Результаты, полученные в ходе термолиза на установке, имеет смысл сравнивать на этапе аналитического исследования с показателями, полученными на анализаторе *TOC*. В качестве дополнительной информации имеет смысл сопоставление данных о χ и *pH* с результатами измерения величины светопропускания проб T_λ на спектрофотометре [6].

В котельном агрегате термолиз некоторых ПКВ начинается в жидкой фазе, а завершается в паровой при температуре пара, идущего на турбину. Поэтому представляет практический интерес создание экспериментальной установки, позволяющей оценивать степень термолиза этих веществ и в жидкой фазе, и в перегретом паре. Для этого В. Н. Щербаков предложил изменить конструкцию описанной установки, добавив вторую ступень, в которую подается часть воды, содержащей ПКВ, из точки отбора, расположенной за реакционным сосудом 6 по ходу движения потока. Во второй ступени происходит нагрев воды в трубке-нагревателе, подобной трубке 5, образование и перегрев пара. Поток перегретого пара направляется по трубке в теплообменник 4 для подогрева воды на входе в нагреватель 5 и снижения расхода электроэнергии при работе установки. Из теплообменника 4 поток направляется в холодильник 7, а затем — в измерительные ячейки дифференциального кондуктометра и *pH*-метра, установленные после задвижки, расположенной за холодильником 7. В качестве линии сравнения при измерениях дифференциальным кондуктометром может быть использована одна из линий с задвижками 10 или 11. Это позволит оценивать изменение χ и *pH*-проб конденсата перегретого пара по сравнению с χ и *pH*-пробами воды перед насосом 2 либо после реакционного сосуда 6. Таким образом появляется возможность исследования характеристик процесса термолиза ПКВ в жидкой и паровой фазах при различных температурах теплоносителя. Уменьшить влияние NH_3 можно за счет *H*-катионирования пробы перед измерением ее χ [4]. В условиях ТЭС и ТЭЦ при анализе результатов измерения χ и *pH* в линии сравнения с задвижкой 10 и в линии конденсата перегретого пара установки полученные данные имеет смысл сравнивать с результатами измерения χ *H*-катионированных проб питательной воды и острого пара.

Описанный выше метод авторов [23] позволяет определять количественный показатель содержания ПКВ в пароводяном тракте и места проникновения ПКВ. Для усовершенствования данного метода предлагается измерять χ при высоких температурах. С этой целью на линиях отбора проб пара в непосредственной близости от точек отбора необходимо установить размещенный в паровом объеме кондуктометрический датчик с охлаждаемым капилляром [28, 29]. При таком подходе отпадает необходимость в использовании пробоотборных линий значительной протяженности и устройств подготовки пробы. В этом случае инерционность процесса измерения снижается в сотни раз, значительно уменьшается влияние NH_3 на результаты измерения χ [29, 30].

Размещение датчика с охлаждаемым капилляром в паровом пространстве автоклава позволяет исследовать распределение ПКВ между кипящей водой и сухим насыщенным паром. В этом случае значения коэффициентов распределения $K_p^{вид}$ можно получить:

— на основании результатов химических анализов проб жидкой и паровой фазы;
— путем измерения χ кипящей воды, содержащей ПКВ, и χ конденсата пара в охлаждаемом датчике [31].

При этом, установив зависимость χ от от концентрации ионогенных примесей — продуктов термолиза ПКВ в жидкой фазе, можно определять $K_р^{вид}$ на основании результатов одновременного измерения χ кипящей воды, содержащей ПКВ, и χ конденсата пара в датчике.

В условиях повышенного содержания ОП в исходной воде исследователи предлагают новые подходы к решению задач на основании экономических расчетов. Принципы построения новой стратегии развития водоподготовки на ТЭС и ТЭЦ основаны на комбинированных технологиях обработки воды, включающих предочистку, ионитную обработку, мембранные и термические методы [7, 32]. Установлено, что при работе на расчетных режимах обеспечивается незначительный вынос органических веществ и продуктов их термолиза в пар и дистиллят отечественных испарительных установок ТЭС [32]. Уменьшить вероятность отклонения от расчетных режимов работы можно за счет совершенствования оперативного контроля и управления процессом генерации пара в испарителях. Необходимо повысить эффективность существующих систем автоматического регулирования. Это можно сделать за счет использования в новых системах регулирования разработанных авторами датчиков для измерения скорости циркуляции концентрата в опускной щели, уровня пены и кондуктометрического сигнализатора наличия жидкости в паре [33–36].

Непрерывный контроль содержания ПКВ в конденсате испарителей может осуществляться путем измерения χ и *pH*-продуктов термолиза в жидкой и паровой фазах на усовершенствованной установке ВТИ, описанной выше. На начальной стадии отработки методики контроля представляется необходимым сопоставлять полученные результаты с результатами измерения *TOC* и T_λ проб конденсата.

Заключение. Предложены способы совершенствования устройств и методов контроля качества теплоносителя ТЭС и ТЭЦ, содержащего ПКВ, позволяющие получать объективную информацию о поведении ПКВ в пароводяном тракте, о ходе процесса термолиза и об источниках поступления ПКВ в котел. Данный подход основан на анализе достоинств и недостатков существующих устройств и методов. Кроме того, результаты выполненной работы позволяют расширить возможности исследования поведения ПКВ в паровой фазе и контроля их содержания. Усовершенствованные устройства контроля могут быть использованы в качестве дополнения к существующим для совместной работы в СХТМ энергоблоков.

Предложен способ совершенствования систем регулирования режимов работы испарительных установок при термической очистке вод от органических примесей — главным образом с целью снижения содержания потенциально кислых веществ в паре и конденсате установок. Для этого рекомендовано использовать ранее разработанные авторами датчики контроля.

Библиографический список

1. Воронов, В. Н. Совершенствование водно-химических режимов и химконтроля на тепловых электростанциях / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова // Теплоэнергетика. — 2010. — № 7. — С. 2–6.

2. Воронов, В. Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 238 с.

3. Об эксплуатации блочных обессоливающих установок на ТЭС сверхкритического давления / А. Б. Вайман [и др.] // Энергетика и электрификация. — 2008. — № 3. — С. 22–31.

4. Ларин, Б. М. Основы математического моделирования химико-технологических процессов обработки теплоносителя на ТЭС и АЭС / Б. М. Ларин, Е. Н. Бушуев. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 306 с.

5. Ларин, Б. М. Обеспечение водно-химического режима котлов суперсверхкритических параметров / Б. М. Ларин, А. Б. Ларин // Энергосбережение и водоподготовка. — 2013. — № 3 (83). — С. 19–23.

6. Белоконова, Н. А. Совершенствование методологии контроля и управления технологическими процессами подготовки воды на тепловых электростанциях : дис. … д-ра техн. наук / Н. А. Белоконова. — Екатеринбург, 2009. — 250 с.

7. Воронов, В. Н. Проблемы организации водно-химических режимов на тепловых электростанциях / В. Н. Воронов, Т. И. Петрова // Теплоэнергетика. — 2002. — № 7. — С. 2–6.

8. Bestimmung von Organischen Verunreinigungen in Leichtwasser Reaktoren / W. Hoffmann [et al.] // VGB Kraftwerkstechnik. — 1995.— Vol. 75, № 9. — P. 814–818.

9. Lepine, L. Characterization and thermal degradation of natural organic matter in steam-condensate cycles of CANDU-PHWR plants / L. Lepine, R. Gilbert // Physical chemistry of aqueous systems: Meeting the needs of industry : proc. 12-th ICPWS Conf. — New York : Begell House, 1995. — P. 824–831.

10. Поведение продуктов термолиза органических веществ в двухфазной области: кипящая вода — равновесный насыщенный пар / О. И. Мартынова [и др.] // Теплоэнергетика. — 1997. — № 6. — С. 8–11.

11. Термическое разложение органических примесей производственных конденсатов / В. А. Коровин и др. // Энергетик. — 1980. — № 5. — С. 24–25.

12. Продукты термолиза органических соединений и их сорбция ионитами БОУ / Б. Н. Ходырев [и др.] // Теплоэнергетика. — 1998. — № 7. — С. 20–24.

13. О поведении органических примесей в тракте тепловой электростанции с барабанными котлами / Т. И. Петрова [и др.] // Теплоэнергетика. — 1995. — № 7. — С. 20–25.

14. Видойкович, С. Исследование поведения сульфатов в пароводяном тракте энергетических установок : дис. … канд. техн. наук / С. Видойкович. — Москва, 2001. —114 с.

15. Петрова, Т. И Теоретический анализ и разработка рекомендаций для оптимизации водно-химических режимов тепловых электростанций : дис. … д-ра техн. наук / Т. И. Петрова. — Москва, 2001. — 46 с.

16. Organic Impurities and Organic Conditioning Agents in the Steam/Water Cycle: A Manufacturer´s Point of View / R. Svoboda [et al.] // Interaction of Organics and Organics Cycle Treatment Chemicals with Water, Steam and Materials : Int. Conference in Stuttgart, 4–6 October 2005. — P. 7.15–7.29.

17. Dooly, R.-B. Fossil plant cycle chemistry and availability problems / R.-B. Dooly // Cycle chemistry symposium : proc. — Midrand : ECOM ; EPRI, 1994. P. 22–25.

18. РД 153-34.1-37.532.4-2001. Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций / РАО «ЕЭС России». — Москва : ЗАО «Энергетические технологии», 2002. — 40 с.

19. Ларин, Б. М. Нормы качества водного теплоносителя и отраслевой стандарт по водоподготовке и водному режиму на ТЭС / Б. М. Ларин, А. Б. Ларин, А. Я. Сорокина // Энергосбережение и водоподготовка. — 2015. — № 4 (96). — С. 56–60.

20. Water-tube boilers and auxiliary installation. European standard EN 12952-12: 2003. Part 12: Requirement for boiler feed water and boiler water quality / European committee for standardization. — Brussel : CEN, 2003.— 17 p.

21. VGB-Standart. Feed water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants / Industrial Plants / Ed. VGB Power Tech e.V. — 3rd edition. — Essen : Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2011. — 111 p.

22. Michal, A.-S. Minimizing levels of Volatile Organic Acids and Carbon Dioxide in Steam / A.-S. Michal, J. S. Kevin // Water circuits : Proc. Int. Conf. Interaction of Organic and Organic Cycle Treatment Chemicals with Water, Steam. — Stuttgart, 2005. — P. 115–119.

23. Способ контроля за содержанием коррозионно-опасных органических соединений в водопаровом тракте теплового энергоблока : патент 2231778 Рос. Федерация : G01N 27/06 / А. Б. Вайман, И. А. Малахов. — № 2002130228/28 ; заявл. 12.11.2002 ; опубл. 27.06.2004, Бюл. № 18. — 4 с.

24. Федосеев, Б. С. Современное состояние водоподготовительных установок и водно-химических режимов ТЭС / Б. С. Федосеев // Теплоэнергетика. — 2005. — № 7. — С. 2–9.

25. Мартынова, О. И. Поведение органики и растворенной углекислоты в пароводяном тракте электростанций / О. И. Мартынова // Теплоэнергетика. — 2002. — № 7. — С. 67–70.

26. Щербинина, С. Д. Установка для определения потенциально кислых органических веществ в возвратных конденсатах ТЭЦ / С. Д. Щербинина, В. А. Коровин, И. Б. Ковалёв // Водный режим барабанных котлов и испарительных установок : сб. науч. тр. / под ред. Р. Н. Гронского. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — С. 41–46.

27. Насос-дозатор : патент на полезную модель 140067 Рос. Федерация : F04B 13/00 / В. Н. Щербаков. — № 2013145924/02 ; заявл. 14.10.13 ; опубл. 27.04.14, Бюл. № 12. — 3 с.

28. Кондуктометрический датчик : а.с. 958943 СССР : G01N 27/02 / Д. Л. Тимрот [и др.]. — № 3248961 ; заявл. 16.02.81 ; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. — 3 с.

29. Щербаков, В. Н. Совершенствование кондуктометрического контроля качества конденсата пара при термической очистке вод / В. Н. Щербаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 3/4 (72/73). — С. 117-124.

30. Щербаков, В. Н. Электролитические свойства растворов аммиака и кондуктометрический контроль качества теплоносителя ТЭС при высоких температурах и давлениях / В. Н. Щербаков, Г. А. Власков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 13, № 7/8 (75). — С. 140–147.

31. Щербаков, В. Н. Исследование электрофизических свойств водных теплоносителей при высоких параметрах : дис. … канд. техн. наук / В. Н. Щербаков. — Москва, 1980. — 204 с.

32. Гришин, А. А. Совершенствование технологии обработки воды, загрязненной органическими веществами, на тепловых электростанциях : дис. … канд. техн. наук / А. А. Гришин. — Москва, 2004. — 185 с.

33. Кататермометр : патент на полезную модель 154 875 Рос. Федерация : G01N 27/02 / В. Н. Щербаков [и др.]. — № 2015112438/28 ; заявл. 06.04.15 ; опубл. 10.09.15, Бюл. № 25. — 6 с.

34. Кондуктометрический сигнализатор уровня пены в испарителях : патент на полезную модель 115491 Рос. Федерация : G01N 27/02 / В. Н. Щербаков, С. В. Вихарев. — № 2011151036/28 ; заявл. 14.12.11 ; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12. — 6 с.

35. Устройство для определения уровня и толщины слоя пены в испарителях : патент на полезную модель 153624 Рос. Федерация : G01F 23/24 / В. Н. Щербаков, Г. А. Власков. — № 2014151970/28 ; заявл. 22.12.14 ; опубл. 27.07.15, Бюл. № 21. — 5 с.

36. Кондуктометрический сигнализатор наличия жидкости в паре : патент на полезную модель 95403 Рос. Федерация : G01N 27/02 / В. Н. Щербаков. — № 2010105310 ; заявл. 15.02.10 ; опубл. 27.06.10, Бюл. № 18. — 6 с.

References

1. Voronov, V.N., Petrova T.I. Sovershenstvovanie vodno-khimicheskikh rezhimov i khimkontrolya na teplovykh elektrostantsiyakh. [Improvement of water-chemistry regimes and chemical control at thermal power plants.] Thermal Engineering, 2010, no. 7, pp. 2–6 (in Russian).

2. Voronov, V.N., Petrova T.I. Vodno-khimicheskie rezhimy TES i AES. [Water-chemistry regimes of TPP and CHP.] Moscow: MEI Publ. House, 2009, 238 p. (in Russian).

3. Weiman, A.B., et al. Ob ekspluatatsii blochnykh obessolivayushchikh ustanovok na TES sverkhkriticheskogo davleniya. [On operation of condensate purification plants at SCP.] Energetika i elektrifikaciya, 2008, no. 3, pp. 22–31 (in Russian).

4. Larin, B.M., Bushuev, E.N. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov obrabotki teplonositelya na TES i AES. [Fundamentals of mathematical modeling of chemical and technological processes of coolant treatment at TPPs and NPSs]. Moscow: MEI Publ. House, 2009. — 306 c. (in Russian).

5. Larin, B.M., Larin, A.B. Obespechenie vodno-khimicheskogo rezhima kotlov supersverkhkriticheskikh parametrov. [Maintenance of water-chemical modes of boilers of ultrasupercritical parameters.] Energysaving and Watertreatment, 2013, no. 3 (83), pp. 19–23 (in Russian).

6. Belokonova, N.A. Sovershenstvovanie metodologii kontrolya i upravleniya tekhnologicheskimi protsessami podgotovki vody na teplovykh elektrostantsiyakh : dis. … d-ra tekhn. nauk. [Development of methodology of control and management of water treatment processes at thermal power plants: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Yekaterinburg, 2009, 250 p. (in Russian).

7. Voronov, V.N., Petrova T.I. Problemy organizatsii vodno-khimicheskikh rezhimov na teplovykh elektrostantsiyakh. [Organization problems of water-chemical regimes at thermal power plants.] Thermal Engineering, 2002, no. 7, pp. 2–6 (in Russian).

8. Hoffmann, W., et al. Bestimmung von Organischen Verunreinigungen in Leichtwasser Reaktoren. VGB Kraftwerkstechnik, 1995, vol. 75, no. 9, pp. 814–818.

9. Lepine, L., Gilbert, R. Characterization and thermal degradation of natural organic matter in steam-condensate cycles of CANDU-PHWR plants. Physical chemistry of aqueous systems: Meeting the needs of industry: Proc. 12-th ICPWS Conf. New York: Begell House, 1995, pp. 824–831.

10. Martynova, O.I., et al. Povedenie produktov termoliza organicheskikh veshchestv v dvukhfaznoy oblasti: kipyashchaya voda — ravnovesnyy nasyshchennyy par. [Behavior of thermolysis products of organic substances in two-phase region: boiling water – equilibrium saturated vapor.] Thermal Engineering, 1997, no. 6, pp. 8–11 (in Russian).

11. Korovin, V.A., et al. Termicheskoe razlozhenie organicheskikh primesey proizvodstvennykh kondensatov. [Thermal decomposition of organic impurities of production condensates.] Energetik, 1980, no. 5, pp. 24–25 (in Russian).

12. Khodyrev, B.N., et al. Produkty termoliza organicheskikh soedineniy i ikh sorbtsiya ionitami BOU. [Products of organic compounds thermolysis and their sorption by CPP ion-exchangers.] Thermal Engineering, 1998, no. 7, pp. 20–24 (in Russian).

13. Petrova T.I., et al. O povedenii organicheskikh primesey v trakte teplovoy elektrostantsii s barabannymi kotlami. [On behavior of organic impurities in the tract of thermal power plant with drum boilers.] Thermal Engineering, 1995, no. 7, pp. 20–25 (in Russian).

14. Vidoykovich, S. Issledovanie povedeniya sul'fatov v parovodyanom trakte energeticheskikh ustanovok: dis. … kand. tekhn. nauk. [Investigation of sulfates behavior in steam-water circuit of power plants: Cand. Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 2001,114 p. (in Russian).

15. Petrova, T.I. Teoreticheskiy analiz i razrabotka rekomendatsiy dlya optimizatsii vodno-khimicheskikh rezhimov teplovykh elektrostantsiy: dis. … d-ra tekhn. nauk. [Theoretical analysis and development of recommendations for optimization of water-chemical regimes of thermal power plants: Dr. Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 2001, 46 p. (in Russian).

16. Svoboda, R., et al. Organic Impurities and Organic Conditioning Agents in the Steam/Water Cycle: A Manufacturer´s Point of View. Interaction of Organics and Organics Cycle Treatment Chemicals with Water, Steam and Materials: Int. Conference in Stuttgart, 4–6 October 2005, pp. 7.15–7.29.

17. Dooly, R.-B. Fossil plant cycle chemistry and availability problems. Cycle chemistry symposium: Proc. Midrand: ECOM; EPRI, 1994, pp. 22–25.

18. RD 153-34.1-37.532.4-2001. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k sis-temam khimiko-tekhnologicheskogo monitoringa vodno-khimicheskikh rezhimov teplovykh elektrostantsiy. [RD 153-34.1-37.532.4-2001. General technical requirements for the systems of chemical-technological monitoring of water-chemical regimes of thermal power plants.] RAO UES of Russia. Moscow: ZAO “Energy Technologies”, 2002, 40 p. (in Russian).

19. Larin, B.M., Larin, A.B., Sorokina, A.Ya. Normy kachestva vodnogo teplonositelya i otraslevoy standart po vodopodgotovke i vodnomu rezhimu na TES. [Quality standards of water coolant and the industry standard for water treatment and water regime at TPPs.] Energy Saving and Water Treatment, 2015, no. 4 (96), pp. 56–60 (in Russian).

20. Water-tube boilers and auxiliary installation. European standard EN 12952-12: 2003. Part 12: Requirement for boiler feed water and boiler water quality. European committee for standardization. Brussel: CEN, 2003, 17 p.

21. VGB-Standard. Feed water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants. Industrial Plants. Ed. VGB Power Tech E.V. 3rd edition. Essen: Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, 2011, 111 p.

22. Michal, A.-S., Kevin, J.-S. Minimizing levels of Volatile Organic Acids and Carbon Dioxide in Steam. Water circuits: Proc. Int. Conf. Interaction of Organic and Organic Cycle Treatment Chemicals with Water, Steam. Stuttgart, 2005, pp. 115–119.

23. Weiman, A.B., Malakhov, I.A. Sposob kontrolya za soderzhaniem korrozionno-opasnykh organicheskikh soedineniy v vodoparovom trakte teplovogo energobloka: patent 2231778 Ros. Federatsiya: G01N 27/06. [Method for monitoring corrosive organic compounds content in water-steam circuit of thermal power unit.] Patent RF, no. 2231778, 2004 (in Russian).

24. Fedoseev, B.S. Sovremennoe sostoyanie vodopodgotovitel'nykh ustanovok i vodno-khimicheskikh rezhimov TES. [Current state of water treatment plants and water-chemical regimes of TPPs.] Thermal Engineering, 2005, no. 7, pp. 2–9 (in Russian).

25. Martynova, O.I. Povedenie organiki i rastvorennoy uglekisloty v parovodyanom trakte elektrostantsiy. [Behavior of organics and dissolved carbon dioxide in steam-water circuit of power plants.] Thermal Engineering, 2002, no. 7, pp. 67–70 (in Russian).

26. Shcherbinina, S.D., Korovin, V.A., Kovalev, I.B. Ustanovka dlya opredeleniya potentsial'no kislykh organicheskikh veshchestv v vozvratnykh kondensatakh TETs. [Installation for determination of potentially acidic organics in return condensates of CHP.] Gronskiy, R.N., ed. Vodnyy rezhim barabannykh kotlov i isparitel'nykh ustanovok: sb. nauch. tr. [Water regime of drum boilers and evaporative plants: coll.of sci.papers.] Moscow: Energoatomizdat, 1990, pp. 41–46 (in Russian).

27. Shcherbakov, V.N. Nasos-dozator: patent na poleznuyu model' 140067 Ros. Federatsiya: F04B 13/00. [Flow-control pump.] Utility Patent RF, no. 140067, 2014 (in Russian).

28. Timrot, D.L., et al. Konduktometricheskiy datchik: a.s. 958943 SSSR: G01N 27/02. [Conductivity sensor.] Authorship Certificate USSR, no. 958943, 1982 (in Russian).

29. Shcherbakov, V.N. Sovershenstvovanie konduktometricheskogo kontrolya kachestva kondensata para pri termicheskoy ochistke vod. [Improving conductometric quality control of steam condensate under thermal water treatment.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 3/4 (72/73), pp. 117–124 (in Russian).

30. Shcherbakov, V.N., Vlaskov, G.A. Elektroliticheskie svoystva rastvorov ammiaka i konduktometricheskiy kontrol' kachestva teplonositelya TES pri vysokikh temperaturakh i davleniyakh. [Aqua ammonia electrolytic character and TPP coolant conductometric quality control under high temperatures and pressures.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 13, no. 7/8 (75), pp. 140–147 (in Russian).

31. Shcherbakov, V.N. Issledovanie elektrofizicheskikh svoystv vodnykh teplonositeley pri vysokikh parametrakh: dis. … kand. tekhn. nauk. [Investigation of electrophysical properties of water coolants at high parameters: Cand. Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 1980, 204 p. (in Russian).

32. Grishin, A.A. Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki vody, zagryaznennoy organicheskimi veshchestvami, na teplovykh elektrostantsiyakh: dis. … kand. tekhn. nauk. [Development of technology of treating water contaminated with organics at thermal power plants: Cand. Sci. (Eng.) diss.] Moscow, 2004, 185 p. (in Russian).

33. Shcherbakov, V.N., et al. Katatermometr: patent na poleznuyu model' 154 875 Ros. Federatsiya: G01N 27/02. [Catathermometer.] Utility Patent RF, no. 154 875, 2015 (in Russian).

34. Shcherbakov, V.N. Vikharev, S.V. Konduktometricheskiy signalizator urovnya peny v isparitelyakh: patent na poleznuyu model' 115491 Ros. Federatsiya : G01N 27/02. [Conductometric foam level indicator in evaporators.] Patent RF, no. 115491, 2012 (in Russian).

35. Shcherbakov, V.N., Vlaskov, G.A. Ustroystvo dlya opredeleniya urovnya i tolshchiny sloya peny v isparitelyakh: patent na poleznuyu model' 153624 Ros. Federatsiya: G01F 23/24 [Device for determining level and thickness of foam layer in evaporators.] Utility Patent RF, no. 153624, 2015 (in Russian).

36. Shcherbakov, V.N. Konduktometricheskiy signalizator nalichiya zhidkosti v pare: patent na poleznuyu model' 95403 Ros. Federatsiya: G01N 27/02. [Conductivity indicator for liquid occurrence in steam.] Utility Patent RF, no. 95403, 2010 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2017
Сдана в редакцию 23.03.2017
Запланирована в номер 07.09.2017

Received 22.03.2017
Submitted 23.03.2017
Scheduled in the issue 07.09.2017

Об авторах:

Щербаков Владимир Николаевич,
доцент кафедры «Гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5682-3792, vladnik48@aaanet.ru

Полешкин Максим Сергеевич,
доцент кафедры «Гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5364-1106, poleshkin.maks@gmail.com

Антоненко Владимир Ильич,
доцент кафедры «Гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7490-5916, viantonen@mail.ru

Authors:

Shcherbakov, Vladimir N.,
associate professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5682-3792, vladnik48@aaanet.ru

Poleshkin, Maxim S.,
associate professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5364-1106, poleshkin.maks@gmail.com

Antonenko, Vladimir I.,
associate professor of the Hydraulics, Hydropneumoautomation and Heat Processes Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7490-5916, viantonen@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.311.24 10.23947/1992-5980-2017-17-4-61-68

Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе»*

В. А. Костюков[1], М. Ю. Медведев[2], А. М. Маевский[3], Н. К. Полуянович[4], В. В. Савченко[5]**
[1, 2, 3, 4] Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация
[5] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Optimization of geometry forms for wind mill mouth of the "rotor-in-socket" type***

V. A. Kostyukov[1], M. Y. Medvedev[2], A. M. Maevskiy[3], N. K. Poluyanovich[4], V. V. Savchenko[5]
[1,2,3,4] Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation
[5] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье рассматриваются метод и результаты аэродинамического исследования вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ) с осесимметричным статором. Цель работы — демонстрация перспективности использования вертикально-осевых ветроэнергетических установок указанного типа в народном хозяйстве.
Материалы и методы. Для выполнения поставленных задач использовался метод виртуальной аэродинамической обдувки и соответствующей оптимизации конструкции по заданному критерию. В рамках указанного метода выполнены численные аэродинамические исследования одиночного ротора заданного типа, а также рассматриваемой системы «ротор + раструб» до и после оптимизации при заданных параметрах невозмущенного потока и вращения ротора. При сопоставлении мощности полученной оптимизированной конструкции ВЭУ с аналогами при прочих равных условиях использован метод аэродинамического подобия.
Результаты исследования. Получены характерные картины аэродинамического обтекания исследованного типа ВЭУ до и после оптимизации. Рассмотрены характерные распределения скалярных и векторных полей при заданных параметрах невозмущенного потока и вращения ротора. Построены графики зависимостей от линейной скорости набегающего потока для проекций момента на валу ротора (при стандартной и оптимизированной формах ВЭУ), а также для соответствующих полезной и побочной мощностей. Проведено сравнение по мощности рассматриваемой оптимизированной ВЭУ с аналогами при прочих равных условиях.
Обсуждение и заключения. Показана перспективность использования вертикально-осевых ВЭУ с осесимметричным статором, предназначенным для создания полезной интерференции с ротором с целью увеличения полезной мощности на валу. Такие ветроэнергетические установки не только не уступают, но и могут превосходить, по крайней мере в среднем, соответствующие классические вертикально-осевые конструкции.

Introduction. The method and results of the aerodynamic research of the vertical axis wind power plants (WPP) with an axisymmetric stator are considered. The work objective is to show the application perspectiveness of vertical axis wind-power plants of the specified type for the national economy.
Materials and Methods. The technique of virtual aerodynamic blasting and the corresponding design optimization at the specified criterion are used to perform the tasks. Within the framework of this technique, numerical aerodynamic analysis of a single rotor of the given type, and of the "rotor + socket" system before and after the optimization at the specified parameters of the freestream and rotor spinning is performed. When comparing the power of the obtained optimized WPP design with analogs, other things being equal, the aerodynamic similarity method is used.
Research Results. Representative patterns of the aerodynamic flow around the investigated WPP type are obtained before and after the optimization. The distinctive distributions of the scalar and vector fields at the given parameters of the freestream and rotor spinning are studied. Dependent graphs are plotted against the linear freestream velocity for the projections of the rotor shaft moment (with WPP standard and optimized forms), as well as for the corresponding useful and side powers. A comparison of the power of the optimized WPP under consideration, and analogues, other factors being equal, is made.
Discussion and Conclusions. The application perspectiveness of the vertical axis wind turbines with an axisymmetric stator designed to create useful interference with the rotor in order to increase useful shaft power is shown. Such wind power plants meet and exceed, at any rate upon the average, the corresponding classical vertical axis structures.

*Работа выполнена по гранту № 213.01-07-2014/01ПЧВГ.
**E-mail: wkost-einheit@yandex.ru, medvmihal@sfedu.ru, maevskiy_andrey@mail.ru, nik1-58@mail.ru
***The research is done within the frame of Grant no. 213.01-07-2014/01PCHVG.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка с осесимметричным статором, полезная аэродинамическая мощность, оптимизированная конструкция, распределения аэродинамических полей, сравнение по мощности с аналогом.

Keywords: wind power plant with axisymmetric stator, useful aerodynamic power, optimized design, aerodynamic field distribution, power comparison with analog.

***Образец для цитирования*:** Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе». В. А. Костюков, [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 61–68.

For citation: Kostyukov V. A., Optimization of geometry forms for wind mill mouth of the “rotor-in-socket” type. V. A. Kostyukov, M. Y. Medvedev, A. M. Maevskiy, N. K. Poluyanovich, V. V. Savchenko. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 61–68.

Введение. Проблема повышения эффективности существующих ветроэнергетических установок (ВУ), состоит в том, что имеющееся на сегодняшний день оборудование ограниченно использует энергию ветра. Проблема не может быть решена без аэродинамических исследований, направленных на определение оптимальных по эффективности геометрических форм роторов и статоров ВУ, а в перспективе — их комплексов. При этом, безусловно, должны учитываться заданные природные, технологические ограничения и лимит себестоимости.

В последнее время распространяется использование ВУ, имеющих ротор не репеллерного (горизонтального), а вертикального типа. При этом диаметр ВУ может быть увеличен (без пропорционального роста себестоимости) до значительно больших размеров, чем допускает конструкция с горизонтальной осью вращения.

Известны усовершенствованные конструкции ВУ с ротором Дарье, не уступающие ВУ с горизонтально-осевыми роторами [1, 2]. Изначальная форма этого ротора представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках. На каждое из крыльев, движущихся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скоростей потока вращающегося крыла.

В [3] предложена установка планетарного типа, работающая на основе эффекта Магнуса [4] следующим образом: дополнительную подъемную силу создают вращающиеся вокруг своей оси цилиндрические элементы ротора — сателлиты. Они расположены центрально симметрично, равномерно по периметру ротора и приводятся во вращение дополнительными электродвигателями. Суммарная подъемная сила всех сателлитов порождает соответствующий осевой момент вращения ротора.

За счет использования специальных направляющих элементов конструкции статора (лопаточного направляющего аппарата и двухзаходной улитки) удается добиться направленности потока в окрестности ротора практически перпендикулярно его оси по радиусу вращения. При этом, как замечает автор [4], удается достичь полезной мощности, в два-три раза превышающей соответствующую мощность классических ВУ при прочих равных условиях.

В работе рассматривается перспективный вариант повышения эффективности использования энергии ветра — компоновка ВУ вместе со специальным обтекателем. Простейшей такой компоновкой, давно и широко используемой в воздухоплавании, авиации и мореходном деле, является ротор в кольце. При этом значительно уменьшаются потери, вызванные отрывом потока на концах лопастей [5]. Кроме того, использование вместе с кольцом еще и выходного устройства (раструба) приводит к значительному уменьшению минимальной скорости запуска ротора (до 45% от скорости ветра).

Анализ ветровых роторов с направлением набегающего потока параллельно оси вращения показал, что использование определенных форм раструбов приводит к значительному повышению (до 40% по сравнению со случаем одиночного ротора) максимального значения коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ), хотя соответствующий удельный коэффициент, полученный нормировкой на площадь Миделева сечения потока, меньше, чем для случая отдельного ротора.

При этом случай ортогональной ориентации обдувающего потока по отношению к оси ротора в кольце до сих пор в должной мере не рассматривался. Тем более не были рассмотрены случаи компоновки с выходными обтекателями различных типов.

В связи с этим представляется актуальным решение задачи о влиянии формы и размеров раструба на роторы ветроколес с вертикальной осью вращения, когда набегающий ветровой поток примерно ортогонален этой оси.

Идея использования раструба заключается в возникновении вертикальной силы тяги за счет перепада давления между верхней и нижней частями раструба в силу закона Бернулли. Данный перепад может быть использован при проектировании такой формы ротора, которая более эффективно использовала бы вертикальный поток.

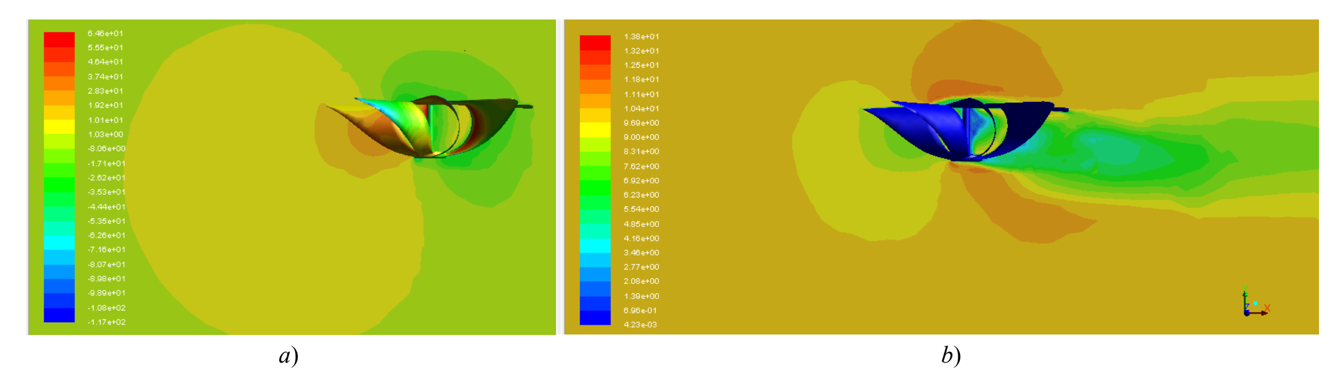
С другой стороны, над одиночным ротором возникает вихревая структура, которая сносится по набегающему потоку ветра. В результате большая часть энергии этой структуры просто рассеивается. Наличие же раструба, осесимметричного ротору, может способствовать локализации энергии этого вихря внутри раструба над ротором и уменьшению скорости его рассеивания. Благодаря этому появляется возможность более эффективно использовать эту энергию ротором при решении задачи оптимизации форм ротора [6], раструба и их ориентации.

Основная часть. Базовое множество форм раструба насчитывало 5 различных геометрий раструба и компоновок его с ротором. В результате исследования, проведенного по алгоритму [7], была получена геометрия раструба, оптимальная с точки зрения заданного критерия и заданной совокупности базовых форм. Ниже рассматриваются некоторые характерные распределения аэродинамических величин для трех случаев: ротора без раструба, роторов с раструбами первоначальной и оптимизированной форм. Для этих случаев были использованы следующие условия: скорость потока $V = 28$ м/с, угловая скорость вращения ротора $f = 6{,}28$ рад/с, гравитация учитывалась**.**

Моделирование аэродинамики ВУ проводилось методом скользящих сеток. Число ячеек комплексной сетки, состоящей из подвижной и вращающейся частей, насчитывало порядка 1,2 млн элементов. В качестве модели турбулентности была выбрана модель Спаларта — Алмараса. Эта модель дает хорошие результаты для пограничных слоев, характеризующихся положительными градиентами давлений.

Обдувка без раструба. Рассмотрим результаты для обдувки одиночного ротора заданной формы. В результате расчета воздействующий на ротор момент оказался равным: M (Mx, My, Mz) = (–4,65; 3,83; 5,83), Н·м.

На рис. 1 представлены характерные распределения статического избыточного давления (*a*) и модуля вектора скорости (*b*).

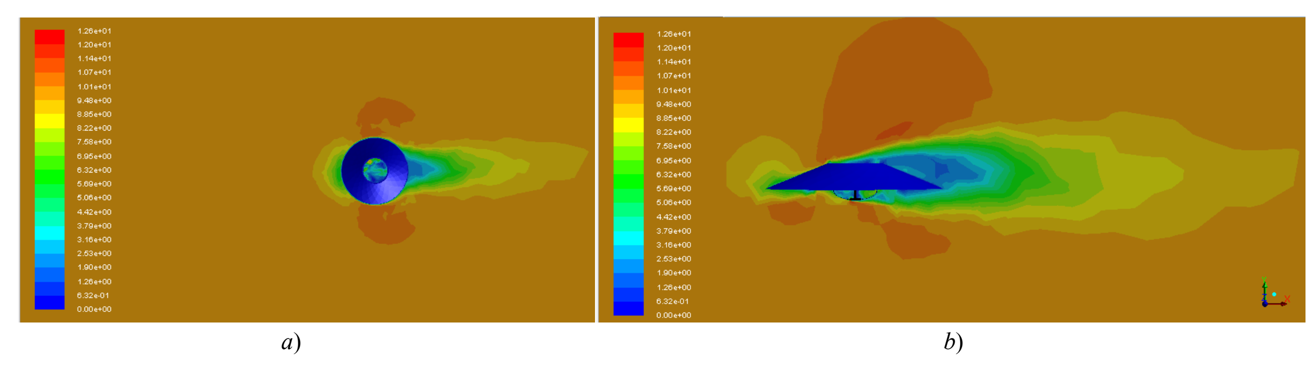


a) *b*)

Рис. 1. Характерные распределения для случая одиночного ротора: распределение статического избыточного давления в плоскости *OXY* (направление набегающего потока на рисунке — справа налево) (*a*); скоростное распределение в плоскости *OXY* (*b*)

Fig. 1. Representative distributions for single rotor case: static pressurization distribution in OXY plane (wind-stream direction in the figure is from right to left) (a); high-speed distribution in OXY plane (b)

Обдувка ротора с раструбом исходной формы. Результаты исследования аэродинамической нагрузки для исходной формы раструба представлены на рис. 2.



a) *b*)

Рис. 2. Характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» исходной формы: распределение модуля скорости в плоскости, параллельной *OXZ* и смещенной на 0,2 м в отрицательном направлении оси *OY* (*a*); распределение модуля скорости в плоскости *OXY*, в которой лежит вектор скорости невозмущенного потока ветра ($V_{wx} = 3 м / с$, $V_{wy} = V_{wz} = 0$) (*b*)

Fig. 2. Representative distributions for "rotor + socket" system of natural form: velocity modulus distribution in plane parallel to OXZ and displaced by 0.2 m in negative OY -axis direction (a); velocity modulus distribution in OXY plane in which the velocity freestream vector lies ($V_{wx} = 3 м / с$, $V_{wy} = V_{wz} = 0$) *(b)*

Воздействующий на ротор момент оказался равным:

$$M\,(Mx,\ My,\ Mz) = (-0{,}74;\ 2{,}01;\ 0{,}833),\ Н·м.$$

Значения этих проекций приведены в базовой системе координат на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY*.

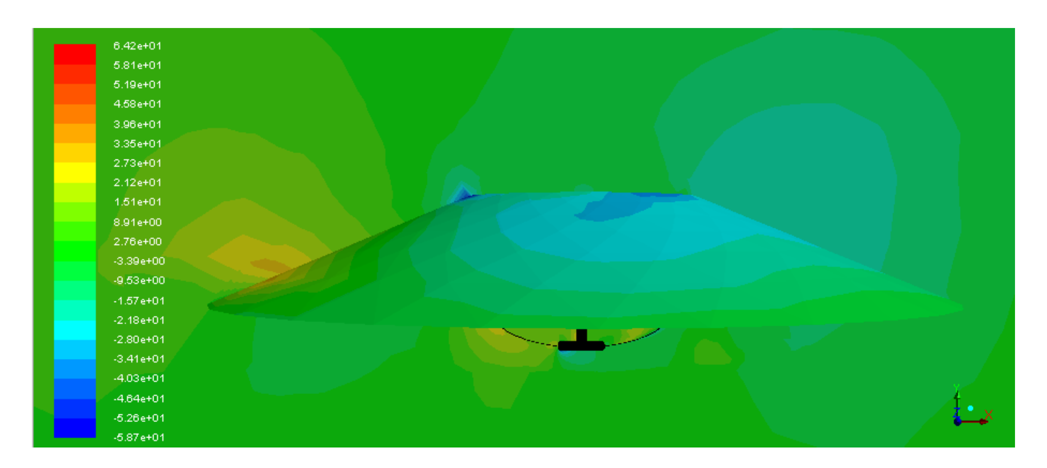


Рис. 3. Распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY*

Fig. 3. Static pressurization distribution in OXY plane

Учитывая изложенное, можно сделать следующий вывод. Распределения модуля скоростей в плоскости *OXZ* во внешней части раструба качественно соответствуют обтеканию цилиндра (рис. 2, *а*), а во внутренней области соответствуют картине обтекания вращающихся многолопастных структур. Кроме того, из рис. 2 следует, что изменение модуля скорости вдоль оси *OY* во внутренней области раструба и его внешней окрестности значительно и требует дополнительного изучения с целью обеспечения большего разрешения потоковых и вихревых структур.

Очевидно, что вихревая структура над ротором в значительной степени сносится по направлению набегающего потока (рис. 2, *б*).

Эффект Бернулли вызывает дополнительную вертикальную тягу вверх, что способно значительно усилить вращательное воздействие на лопасти крыльчатки ротора заданной формы. Однако из распределения статического давления (рис. 3) следует, что при данных исходных форме и размерах раструба перепад давлений между верхней и нижней частями раструба недостаточен для его продуктивного использования.

Результаты оптимизации формы раструба. По разработанному алгоритму была проведена оптимизация исходной формы раструба, которая позволила увеличить на 25 % вращающий аэродинамический момент, а, следовательно, и полезную мощность, возникающие на роторе при одних и тех же условиях ($V_{w1} = 10 м/с$, $\omega = 6,28 рад/с$) по сравнению со случаем без раструба. Эти ключевые результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Сравнительные результаты для трех характерных случаев ВУ

Comparative results for three typical cases of WPP

Расчетная величина	Момент силы (Н·м) при различных конструкциях раструба		
	Без раструба	С первоначальным раструбом	С оптимизированным раструбом
Mx	4,65	0,74	4,10
Mz	5,83	0,833	2,84
My	**3,83**	**2,01**	**4,65**

Первоначальная форма раструба обеспечивает вращающий момент, примерно в два раза меньший, чем в случае без раструба. Это говорит о степени влияния формы раструба на вращающий осевой момент ротора: при модификации этот момент увеличивается на 125 % по сравнению с исходными формой и компоновкой раструба.

На рис. 4 приведены характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» оптимизированной формы.

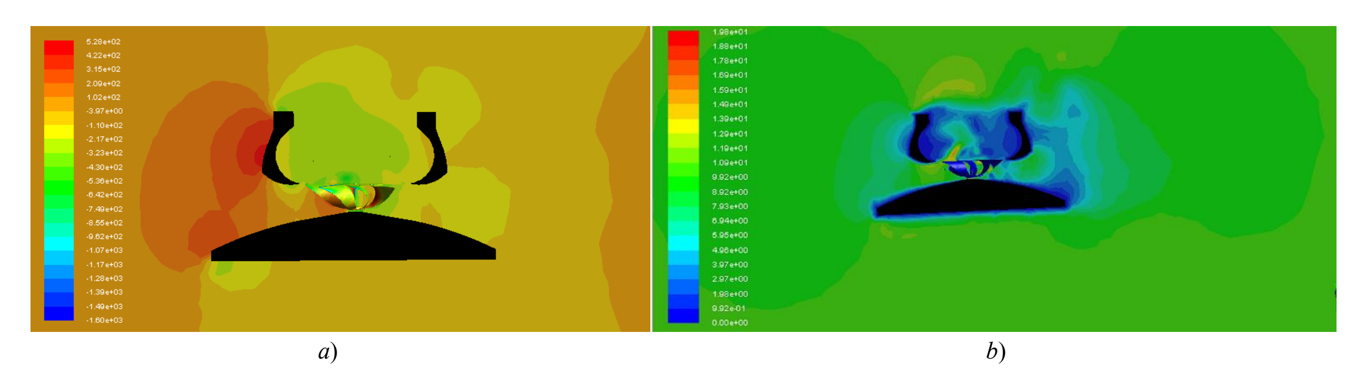


Рис. 4. Характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» оптимизированной формы: распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY* (*a*); распределение модуля скорости в плоскости *OXY* (*b*)

Fig. 4. Representative distributions for "rotor + socket" system of optimized form: static pressurization distribution in OXY plane (a); velocity modulus distribution in OXY plane (b)

Как видно из рис. 4, *а*, распределение статического избыточного давления по вертикали внутри раструба становится более неравномерным, что усиливает вертикальную тягу и повышает эффективность использования данной формы ротора. Наличие раструба также приводит к значительному увеличению доли составляющей момента *My* (табл.1) по отношению к *Mx* и *Mz*, т. е. по сравнению со случаем без раструба (для обеих рассмотренных его форм) отмечается уменьшение по модулю отношений *Mx*/*My*, *Mz*/*My*. Это способствует снижению паразитного воздействия на ось ротора и росту устойчивости всей конструкции ВУ.

Полученные результаты показывают, что наличие раструба определенной формы позволяет увеличить значение аэродинамической мощности одиночного ротора минимум на 25 %.

Расчет аэродинамической мощности оптимизированной ВУ. Выполним расчет мощностей полученной оптимальной формы ВУ с имеющимся аналогом ВУ классического типа. Для этого сопоставим вычисленное значение момента *My* для полученной оптимальной формы установки с параметрами описанной в [3] ВЭУ-500 Днепропетровского КБ «Южное»:

— мощность — 500 кВт;
— расчетная скорость ветра — 12,9 м/с;
— диаметр винта *D*2 = 38,3 м;
— расстояние от основания до оси ветроколеса — 35 м;
— масса ветроагрегата — 48 т.

Полезная мощность оптимизированной ВУ, рассмотренной выше, может быть рассчитана по формуле

$$P_1 = M_y(Vw,\omega)\cdot\omega\cdot\langle\eta_{red}\rangle\cdot\langle\eta_{gen}\rangle, \qquad (1)$$

где $\langle\eta_{red}\rangle$, $\langle\eta_{gen}\rangle$ — средние величины КПД редуктора и генератора, значения которых принадлежат, как правило, следующим диапазонам: $\eta_{red} = 0{,}9 \div 0{,}95$, $\eta_{gen} = 0{,}7 \div 0{,}9$ [8–10].

Если бы установка имела диаметр D_2, то вращающий момент, порождаемый ею при скорости $V_{w2} = 12{,}9\,м/с$ и угловой скорости вращения ротора $\omega = 6{,}28\,рад/с$, был бы равен [10]:

$$P_2 = P_1\left(D_2/D_1\right)^3\left(V_{w2}/V_{w1}\right)^2 = 1034\ кВт. \qquad (2)$$

Здесь с достаточной для практики точностью предположено, что безразмерный коэффициент момента вращения при таком масштабировании не изменяется.

Таким образом, если бы ротор полученной нами оптимальной формы ВУ имел диаметр D_2 и весьма небольшую угловую скорость вращения $\omega = 6{,}28\,рад/с$, то эта установка имела бы выходную мощность, более чем в два раза превышающую соответствующую мощность описанной в [3] ВУ классического типа при стандартных условиях ее функционирования.

Из рис. 5 видно, что значение момента M_y существенно увеличивается при переходе порога скорости в 20 м/с за счет изначально разработанной конструкции раструба.

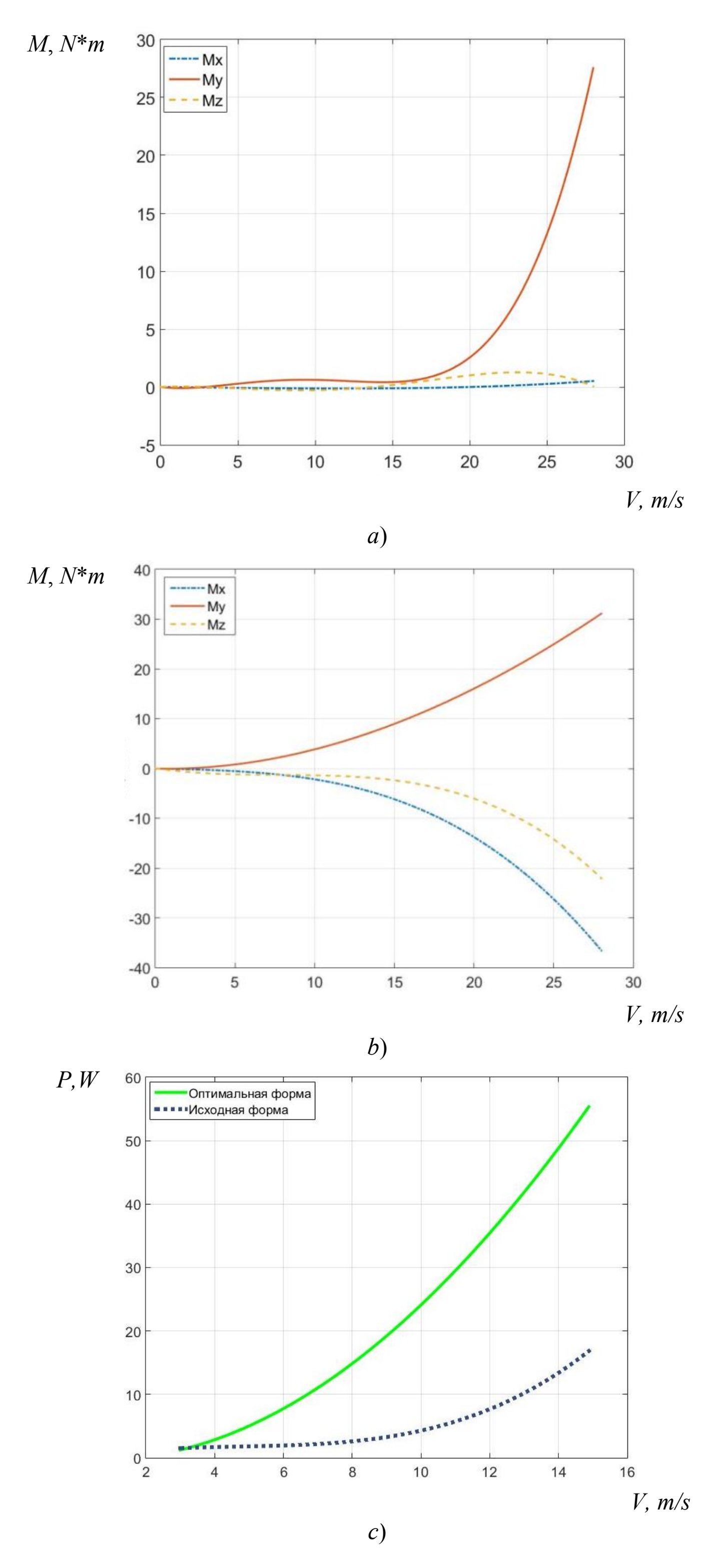


Рис. 5. График зависимостей: моментов (M_x , M_y , M_y) стандартной формы ВУ от линейной скорости V набегающего потока (*a*); моментов (M_x , M_y , M_z) оптимизированной формы ВУ от линейной скорости V набегающего потока (*b*); аэродинамических мощностей P стандартной и оптимизированной формы от скорости V набегающего потока (*c*)

Fig. 5. Dependency graph: moments (M_x , M_y , M_y) of WPP standard form on linear velocity V of free-stream flow (a); moments (M_x , M_y , M_z) of WPP optimized form on linear velocity V of free-stream flow (b); aerodynamic capacities P of WPP standard and optimized forms on free-stream flow velocity V (c)

Из графиков также видно, что несущественным образом изменяются моменты M_x и M_z . Это показывает, что большая часть силы ветра, воздействующей на ВУ по осям *OX* и *OZ*, используется в результате вращения ВУ.

Рассмотрим результаты моделирования ВУ с оптимизированной геометрией (рис. 5, *б*). Оптимизация геометрии позволила увеличить аэродинамический момент на роторе ВУ более чем в 2 раза. Также из графика видно, что в данном случае увеличиваются моменты M_x M_z . Это значит, что часть энергии, получаемая от силы ветра, рассеива-

ется и не используется ВУ. Таким образом, ожидаемым результатом дальнейшей оптимизации формы является существенное уменьшение разброса энергии ветра и его концентрация на вращательном моменте M_y. На рис. 5, *в* представлен график зависимости рассчитанной аэродинамической мощности стандартной и оптимизированной ВУ.

Итак, разработанная оптимизированная ВУ демонстрирует существенное (более чем в 2,5 раза) увеличение вырабатываемой мощности (рис. 5). При средней скорости 8–10 м/с разработанная ВУ будет вырабатывать от 900 Вт/ч до 1,5 кВт/ч.

Выводы. Полученные результаты показывают, что использование оптимизированных форм раструбов ВУ является перспективным и не уступает в эффективности формам, рассмотренным в [1–4]. При этом значительно уменьшаются потери, вызванные отрывом потока на концах лопастей [5]. Кроме того, использование вместе с кольцом еще и выходного устройства (раструба) приводит к значительному уменьшению минимальной скорости запуска ротора (до 45 % от скорости ветра). Использование определенных форм раструбов позволяет существенно (до 40% по сравнению со случаем одиночного ротора) повысить значение коэффициента использования энергии ветра.

Использование раструба позволяет создать вертикальную силу тяги за счет перепада давлений между верхней и нижней частями раструба по закону Бернулли. Данный перепад может быть использован при проектировании такой формы ротора, при которой вертикальный поток используется более эффективно. Получены оптимальные формы раструба при заданном роторе и соответствующая компоновка усовершенствованного раструба с ротором. Их применение обеспечивает максимальное среднее значение полезной аэродинамической мощности ветрового потока ротора на заданном диапазоне ветровых нагрузок. Распределение статического избыточного давления по вертикали внутри раструба становится менее равномерным, что усиливает вертикальную тягу и повышает эффективность использования данной формы ротора (рис. 4). Раструб значительно увеличивает долю составляющей момента *My* по отношению к *Mx* и *Mz*, т. е. происходит уменьшение по модулю отношений *Mx*/*My*, *Mz*/*My* в сравнении со случаем без раструба для обеих рассмотренных его форм (рис. 4). Это способствует уменьшению паразитного воздействия на ось ротора и повышению устойчивости всей конструкции ВУ.

Библиографический список

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 392 с.

2. Горелов, Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье /Д. Н. Горелов // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 3. — С. 325–333.

3. Михненков, Л. В. Ветроэнергетическая станция планетарного типа / Л. В. Михненков // Научный вестник МГТУ. — 2008. — № 125. — С. 16–24.

4. Михненков, Л. В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа / Л. В. Михненков // Научный вестник МГТУ. — 2002. — № 49. — С. 110–113.

5. Хаскин, Л. Я. Аэродинамика ветроколеса с обтекателем и выходным устройством / Л. Я. Хаскин // Ученые записки ЦАГИ. — 1993. — Т. 24, № 4. — С. 217–222.

6. Устройство для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию : патент 2552635 Рос. Федерация : F03D3/04 / В. В. Савченко, В. С. Степанов. — № 2013144670 ; заявл. 07.10.13 ; зарегистр. 08.05.15 ; опубл. 10.06.15, Бюл. № 16. — 4 с.

7. Юрьев, Б. Н. Аэродинамический расчет вертолетов / Б. Н. Юрьев — Москва : Государственное издательство оборонной промышленности, 1956. — 176 с.

8. Петров, К. П. Аэродинамика тел простейших форм / К. П. Петров. — Москва : Факториал, 1998. — 231 с.

9. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика. Часть 1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла / Н. Ф. Краснов. — Москва : Высшая школа, 1976. — 255 с.

10. Дубяго, М. Н. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 7 (168). — С. 230–237.

References

1. Twidell, J., Weir, T. Vozobnovlyaemye istochniki energii. [Renewable energy resources.] Moscow: Energoatomizdat, 1990, 392 p. (in Russian).

2. Gorelov, D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'ye. [Energy characteristics of Darreus rotor.] Thermophysics and Aeromechanics, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 325–333 (in Russian).

3. Mikhnenkov, L.V. Vetroenergeticheskaya stantsiya planetarnogo tipa. [Planetary wind station.] The Scientific Bulletin of MSTU, 2008, no. 125, pp. 16–24 (in Russian).

4. Mikhnenkov, L.V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa. [Planetary aerogenerator.] The Scientific Bulletin of MSTU, 2002, no. 49, pp. 110–113 (Ekspluatatsiya vozdushnogo transporta i remont aviatsionnoy tekhniki. Bezopasnost' poletov. [Operation of air transport and repair of aviation equipment. Safety of flights.]) (in Russian).

5. Khaskin, L.Y. Aerodinamika vetrokolesa s obtekatelem i vykhodnym ustroystvom. [Aerodynamics of windwheel with radome and output device.] TsAGI Science Journal, 1993, vol. 24, no. 4, pp. 217–222 (in Russian).
6. Savchenko, V.V., Stepanov, V.S. Ustroystvo dlya preobrazovaniya kineticheskoy energii vetra v mekhanicheskuyu energiyu: patent 2552635 Ros. Federatsiya: F03D3/04. [Device for transformation of wind kinetic energy into mechanical energy.] Patent RF, no. 2552635, 2015 (in Russian).
7. Yuryev, B.N. Aerodinamicheskiy raschet vertoletov. [Aerodynamic analysis of helicopters.] Moscow: Gos. izd-vo oboronnoy promyshlennosti, 1956, 176 p. (in Russian).
8. Petrov, K.P. Aerodinamika tel prosteyshikh form. [Aerodynamics of simply-shaped bodies.] Moscow: Faktorial, 1998, 231 p. (in Russian).
9. Krasnov, N.F. Aerodinamika. Chast' 1. Osnovy teorii. Aerodinamika profilya i kryla. [Aerodynamics. Part 1. Theory fundamentals. Airfoil and wing aerodynamics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 255 p. (in Russian).
10. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K., Pshikhopov, V.Kh. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy. [Assessment and forecasting the insulation of power cable lines.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2015, no. 7 (168), pp. 230–237 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.06.2017
Сдана в редакцию 20.06.2017
Запланирована в номер 25.09.2017

Received 19.06.2017
Submitted 20.06.2017
Scheduled in the issue 25.09.2017

Об авторах:

Костюков Владимир Александрович,
доцент кафедры «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6116-9999
wkost-einheit@yandex.ru

Медведев Михаил Юрьевич,
заведующий кафедрой «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5205-3572,
medvmihal@sfedu.ru

Маевский Андрей Николаевич,
техник НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д),
ORCID: http://orcid.org/0000- 0002-0985-1851
maevskiy_andrey@mail.ru

Полуянович Николай Константинович,
доцент кафедры «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000- 0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Савченко Василий Владимирович,
ведущий инженер управления научных исследований Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ip_kovaleva13@mail.ru

Authors:

Kostyukov Vladimir A.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6116-9999
wkost-einheit@yandex.ru

Medvedev, Mikhail Yu.,
head of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5205-3572,
medvmihal@sfedu.ru

Maevskiy, Andrey N.,
technician of Research and Development Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D),
ORCID: http://orcid.org/0000- 0002-0985-1851
maevskiy_andrey@mail.ru

Poluyanovich, Nikolay K.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000- 0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Savchenko, Vasily V.,
senior engineer of the Scientific Research Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ip_kovaleva13@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-593 10.23947/1992-5980-2017-17-4-69-76

Зависимость энергоскоростных характеристик пневмопривода от начальных параметров дополнительного объема при торможении противодавлением*

А. Н. Сиротенко[1], С. А. Партко[2], Саед Бакир Аля[3]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3]Алеппо университет, г. Алеппо, Сирия

Dependence of energy-speed characteristics of pneumatic drive on initial parameters of additional volume under counterpressure braking***

A. N. Sirotenko[1], S. A. Partko[2], Saed Bakir Ala[3]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3]University of Aleppo, Aleppo, Syria

Введение. Для механизации и автоматизации технологических процессов, ввиду известных преимуществ, активно используются пневматические приводы. Однако значительная инерционность выходного звена пневмопривода, а также сжимаемость рабочей среды негативно сказываются на быстродействии привода и затрудняют безударный останов. Эта особенность обусловила наличие большого количества способов торможения выходного звена пневмопривода. Способ торможения противодавлением представляет интерес с точки зрения рекуперации энергии сжатого при торможении воздуха в дополнительный объем. Целью работы являлось выявление зависимости между начальными параметрами дополнительного объема и энергоскоростными характеристиками пневмопривода при торможении противодавлением.

Материалы и методы. Спланирован и проведен вычислительный двухфакторный эксперимент. В качестве независимых факторов принимались начальное давление и геометрический объем дополнительного объема. Факторы варьировались на трех уровнях. Быстродействие оценивалось по времени перемещения, а энергоемкость — по назначенному безразмерному критерию. Для описания зависимости факторов и критериев составлены и решены уравнения регрессии.

Результаты исследований. Получены и представлены функциональные и графические зависимости энергоскоростных характеристик пневмопривода от параметров дополнительного объема, определены их рациональные значения. Установлено, что:

1. Максимальное быстродействие пневмопривода достигается при начальных параметрах дополнительного объема:

$$p_{ак}=5\cdot10^5 Па \text{ и } V_{ак}=42\cdot10^{-6} м^3.$$

2. Минимальным энергетическим затратам в пневмопроводе соответствуют следующие начальные параметры дополнительного объема:

$$p_{ак}=2\cdot10^5 Па \text{ и } V_{ак}=210\cdot10^{-6} м^3.$$

Introduction. Pneumatic drives are abundantly used for mechanization and automation of technological processes because of the known advantages. But considerable inertia of the output link of the pneumatic drive and compressibility of the operating environment affect the drive performance and a shock-free stop block. This feature has caused existence of a large number of ways of braking of the output link of the pneumatic drive. The counterpressure braking technique is of interest from the point of view of the pressed air energy recuperation under braking into an additional volume. The work objective is to identify the dependence between the initial parameters of the additional volume and energy high-speed characteristics of the pneumatic drive under the counterpressure braking.

Materials and Methods. A computing two-factor experiment is planned and conducted. The initial pressure and geometrical volume of the additional volume were accepted as independent factors. The factors varied at three levels. The speed was assessed on transfer time, and power consumption — on the assigned dimensionless criterion. For the description of dependence of factors and criteria, regression equations were worked out and solved.

Research Results. Functional and graphic dependences of the energy high-speed characteristics of the pneumatic drive on parameters of the additional volume are received and presented; and their rational values are defined. It is established that:

1. The maximum speed of the pneumatic drive is achieved at the initial parameters of the additional volume:

$$p_{ак}=5\cdot10^5 Pa \text{ and } V_{ак}=42\cdot10^{-6} m^3.$$

2. The following initial settings of the additional volume correspond to minimum energy cost in the pneumatic drive:

$$p_{ак}=2\cdot10^5 Pa \text{ and } V_{ак}=210\cdot10^{-6} m^3.$$

Discussion and Conclusions. Variation of the initial

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: parlana@spark-mail.ru, andsirotenko@yandex.ru, Imad12sb@gmail.com
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Обсуждение и заключения. При торможении противодавлением изменение начальных параметров дополнительного объема влияет на энергоскоростные характеристики пневмопривода.

parameters of the additional volume affects the energy-speed characteristics of the pneumatic drive under the counterpressure braking.

Ключевые слова: пневматический привод, эксперимент, уравнения регрессии, рекуперация, энергосбережение, противодавление, дополнительный объем.

Keywords: pneumatic drive, experiment, regression equations, recuperation, energy saving, counterpressure, additional volume.

***Образец для цитирования*:** Сиротенко, А. Н. Зависимость энергоскоростных характеристик пневмопривода от начальных параметров дополнительного объема при торможении противодавлением / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко, Саед Бакир Аля. // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 69–76.

For citation: A.N. Sirotenko, S.A. Partko, Saed Bakir Ala. Dependence of energy-speed characteristics of pneumatic drive on initial parameters of additional volume under counterpressure braking.Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 69–76.

Введение. В технологическом оборудовании пневмопривод часто применяется для автоматизации и механизации вспомогательных операций. Инерционность его выходных звеньев и сжимаемость рабочей среды ограничивают скоростные характеристики и затрудняют остановку без отскока, для компенсации которого применяются различные способы и устройства [1–7]. Эти особенности обусловили наличие большого числа способов управления законами торможения выходного звена пневмопривода, наименее энергоемким из которых является способ противодавления [1,6]. В данном способе перспективным, с точки зрения энергосбережения, является торможение с рекуперацией энергии в дополнительный объем [1,6].

Целью работы являлось определение зависимостей энергетических и скоростных характеристик пневмопривода от начальных параметров рекуперативного объема при торможении выходного звена противодавлением. Необходимо было спланировать и провести вычислительный эксперимент и установить влияние параметров дополнительного объема на энергетические и скоростные характеристики пневмопривода.

Основная часть. В пищевом производстве наиболее полно возможности пневмопривода реализуются при автоматизации технологических процессов фасовки и упаковки [8–10], что обусловило значительную степень пневмофикации фасовочно-упаковочного оборудования.

Для пневматического привода фасовочно-наполнительного автомата «Алур-1500» было предложено схемотехническое решение, обеспечивающее торможение противодавлением и рекуперацию энергии сжатого при торможении воздуха в дополнительный объем [11–13]. Газодинамические процессы, протекающие в полостях пневмодвигателя, для сделанных допущений [14] были описаны математической моделью [15]. После подтверждения адекватности математической модели [16,17], для установления зависимости энергоскоростных характеристик пневмопривода от начальных параметров дополнительного объема был спланирован и проведен вычислительный эксперимент.

В качестве независимых друг от друга факторов были приняты начальное давление в дополнительном объеме (x_2) и величина дополнительного объема (x_1), которые варьировались на пяти уровнях (таблица 1). В качестве критерия быстродействия (Y_1) принимали время рабочего хода исполнительного органа (t). За критерий энергоемкости (Y_2) приняли отношение произведения величины дополнительного объема (x_1) на начальное давление в нем (x_2) к произведению конечного давления в выхлопной полости на сумму дополнительного и «пассивного» объемов пневмодвигателя. Чем меньше критерии, тем лучше.

Таблица 1

Table 1

Уровни варьирования факторами в вычислительном эксперименте

Variation levels by factors in computing experiment

Обозначение	Фактор	Уровни варьирования		
x_1	Дополнительный объем ($\times 10^{-6}$м^3)	42	126	210
x_2	Начальное давление в дополнительном объеме ($\times 10^5$Па)	1	3	5

Нижний уровень фактора обозначим «–1», средний – «0», верхний – «+1».

Уровни факторов закодируем в символьном виде (таблица 2). Представим уравнения регрессии $Y_1(x_1,x_2)$ и $Y_2(x_1,x_2)$ в виде полинома (1), (2):

$$Y_1 = a_0 + a_1\bar{x}_1 + a_2\bar{x}_2 + a_{12}\bar{x}_1\bar{x}_2 + a_{11}\bar{x}_1^2 + a_{22}\bar{x}_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = b_0 + b_1\bar{x}_1 + b_2\bar{x}_2 + b_{12}\bar{x}_1\bar{x}_2 + b_{11}\bar{x}_1^2 + b_{22}\bar{x}_2^2 \quad (2)$$

Таблица 2

Table 2

Результаты вычислительных опытов двухфакторной модели

Results of computing experiments of two-factor model

Факторы		Критерии	
Величина дополнительного объема, x_1	Начальное давление в дополнительном объеме, x_2	Быстродействие, Y_1	Энергоемкость, $Y_{2,}$
–	–	0,922	3,331
–	0	0,918	3,362
–	+	0,911	3,415
0	–	0,951	2,220
0	0	0,934	2,239
0	+	0,934	2,281
+	–	0,968	1,879
+	0	0,956	1,876
+	+	0,946	1,915

Для вычисления коэффициентов уравнений регрессии, с учетом того, что факторы представлены в символьном виде, построим следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} + a_{11} + a_{22} = 0,922 \\ a_0 - a_1 + a_{11} = 0,918 \\ a_0 - a_1 - a_2 - a_{12} + a_{11} + a_{22} = 0,911 \\ a_0 - a_2 + a_{22} = 0,951 \\ a_0 = 0,934 \\ a_0 + a_2 + a_{22} = 0,934 \\ a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} + a_{11} + a_{22} = 0,968 \\ a_0 + a_1 + a_{11} = 0,956 \\ a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} + a_{11} + a_{22} = 0,946 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b_0 + b_1 + b_2 + b_{12} + b_{11} + b_{22} = 3,331 \\ b_0 - b_1 + b_{11} = 3,362 \\ b_0 - b_1 + b_2 - b_{12} + b_{11} + b_{22} = 3,415 \\ b_0 - b_2 + b_{22} = 2,221 \\ b_0 = 2,239 \\ b_0 + b_2 + b_{22} = 2,281848 \\ b_0 + b_1 - b_2 - b_{12} + b_{11} + b_{22} = 1,879261 \\ b_0 + b_1 + b_{11} = 1,876611 \\ b_0 + b_1 + b_2 + b_{12} + b_{11} + b_{22} = 1,915543 \end{cases} \quad (4)$$

После решения систем (3) и (4) получим следующие коэффициенты регрессии для символьных переменных:

a_0=0,934; a_1=0,01983; a_2= – 0,0083; a_{11}=0,003; a_{12}= – 0,00275; a_{22}=0,0085;

b_0=2,2395; b_1= – 0,73976; b_2=0,03014; b_{11}=0,38016; b_{12}= – 0,01182; b_{22}=0,011732;

Уравнения регрессии в символьных переменных, с учетом полученных коэффициентов, примет следующий вид:

$$Y_1 = 0,968 + 0,01983\bar{x}_1 - 0,0083\bar{x}_2 - 0,00275\bar{x}_1\bar{x}_2 + 0,003\bar{x}_1^2 + 0,0085\bar{x}_2^2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 2,2395 - 0,73976\bar{x}_1 + 0,03014\bar{x}_2 - 0,01182\,\bar{x}_1\bar{x}_2 + +0,38016\bar{x}_1^2 + 0,01173\bar{x}_2^2 \quad (6)$$

Анализ результатов сравнения полученных уравнений с данными из вычислительного эксперимента показал хорошую сходимость и представлен в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты сравнительного анализа полученных уравнений регрессии с данными вычислительного эксперимента

Comparative analysis results of obtained regression equations with computing experiment data

$\bar{x}_1$	Y_1	$Y_1^{таб}$	δ_1,%	$\bar{x}_2$	$Y_2^{таб}$	Y_2	δ_2,%
–	0,922	0,931	–1	–	3,329	3,331	0,007
–	0,918	0,917	0,09	0	3,359	3,362	0,1
–	0,911	0,92	–0,99	+	3,352	3,415	1,827
0	0,951	0,951	0,018	–	2,221	2,220	–0,016
0	0,934	0,934	0	0	2,239	2,239	0
0	0,934	0,934	–0,018	+	2,281	2,281	0,016
+	0,968	0,976	–0,87	–	1,873	1,879	0,311
+	0,956	0,956	–0,087	0	1,879	1,876	–0,18
+	0,946	0,954	–0,872	+	1,910	1,915	0,286

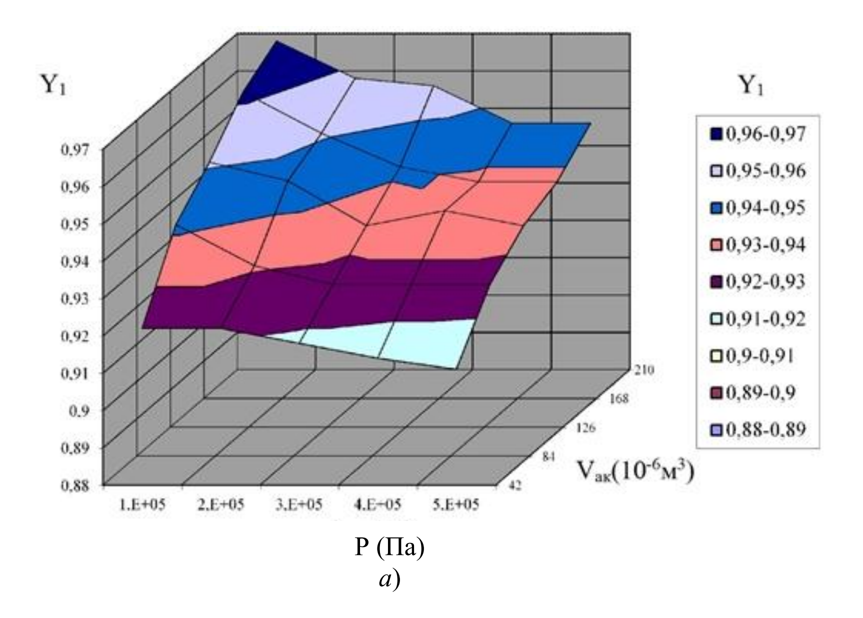
Найдем минимум $Y_1(\bar{x}_1; \bar{x}_2)$ и максимум $Y_2(\bar{x}_1; \bar{x}_2)$, взяв частные производные $\frac{\partial Y_1}{\partial x_1}$, $\frac{\partial Y_1}{\partial x_2}$, $\frac{\partial Y_2}{\partial x_1}$, $\frac{\partial Y_2}{\partial x_2}$ от уравнений (5) и (6). После дифференцирования и приравнивания к нулю получим системы нормальных уравнений:

для $\frac{\partial Y_1}{\partial x_1}$, $\frac{\partial Y_1}{\partial x_2}$,

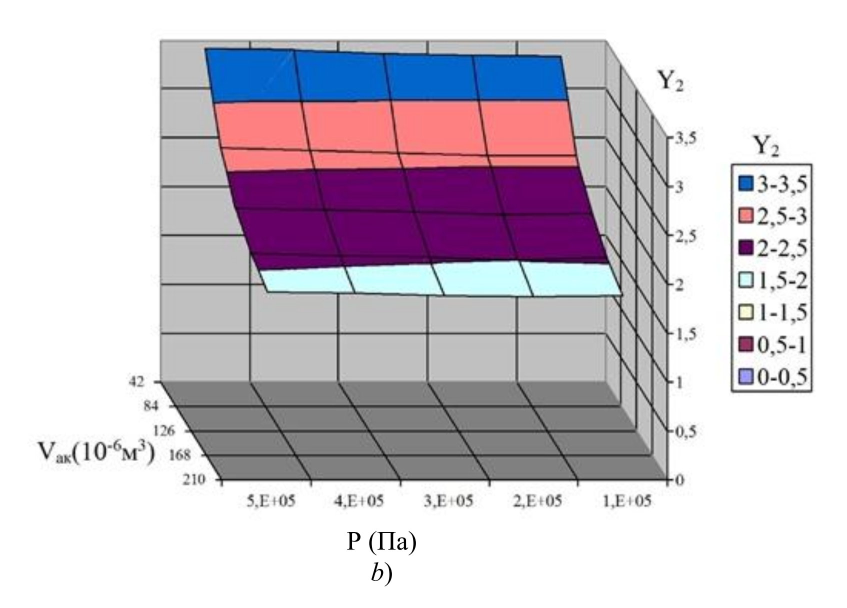
$$\begin{cases} 0,006\bar{x}_1 - 0,0027\bar{x}_2 = -0,01983 \\ -0,00275\bar{x}_1 + 0,0170\bar{x}_2 = 0,0083 \end{cases} \left| \begin{array}{l} \bar{x}_1^{опт} = 3,3275 \\ \bar{x}_2^{опт} = -0,04809 \end{array} \right. \quad (7)$$

для $\frac{\partial Y_2}{\partial x_1}$, $\frac{\partial Y_2}{\partial x_2}$,

$$\begin{cases} -0,01182\bar{x}_1 - 0,7603\bar{x}_2 = 0,73977 \\ 0,01182\bar{x}_1 + 0,0234\bar{x}_2 = -0,03014 \end{cases} \left| \begin{array}{l} \bar{x}_1^{опт} = 0,9605 \\ \bar{x}_2^{опт} = -0,8008 \end{array} \right. \quad (8)$$



P (Па)
а)



P (Па)
b)

Рис. 1. Зависимость критериев: а — быстродействия, (*Y_1)*; б — энергоемкости, (*Y_2)* – от начальных параметров дополнительного объема, давления *(р)* и величины объема *($V_{ак}$)*

Fig.1. Dependence of criteria: a – speed (Y_1); b – power consumption (Y_2) – on initial parameters of additional volume, pressure (p) and volume size (V_{ak})

Подставляя полученные оптимальные значения в уравнения регрессии (5) и (6) для Y_1, Y_2 находим их оптимум:

$$Y_1^{опт}=0,901,$$

$$Y_2^{опт}=1,872.$$

Отклонение от данных вычислительного эксперимента $\delta_1=1,07\%$, $\delta_2=-0,513\%$.

После проведения аппроксимации для критериев Y_1, Y_2, учитывая, что $x_1=h$ и $x_2=p$, получены следующие степенные зависимости:

$$Y_1 = 1,1309 h_i^{0,02424} p_i^{-0,01241} \quad (9)$$

$$Y_2 = 1,2122 h_i^{-0,35915} p_i^{0,01513} \quad (10)$$

где *h (м)*, *p (Па)* — величина дополнительного объема, приведенная к площади поршня пневмодвигателя и абсолютное начальное давление в дополнительном объеме соответственно.

После раскодирования символьных переменных уравнения регрессии (5) и (6) принимают следующий вид:

$$Y_1 = 0,934 + 9,9166 \cdot 10^{-2}(h-0,3) - 4,1666 \cdot 10^{-8}(p-300000) -$$
$$-6,875 \cdot 10^{-8}(h \cdot p - 300000h - 0,3p + 90000) + 7,5 \cdot 10^{-2}(h^2 - 0,6h + 0,09) +$$
$$+2,125 \cdot 10^{-13}(p^2 - 600000p + 9 \cdot 10^{10})$$

$$Y_2 = 2,2395 - 3,6988(h-0,3) + 1,5074 \cdot 10^{-7}(p-300000) -$$
$$-2,9559 \cdot 10^{-7}(h \cdot p - 300000h - 0,3p + 90000) + 9,50413 \cdot$$
$$(h^2 - 0,6h + 0,09) + 2,933 \cdot 10^{-13}(p^2 - 600000p + 9 \cdot 10^{10})$$

Графически зависимость критериев быстродействия и энергоемкости пневмопривода от параметров дополнительного объема представлена на рис. 1.

Максимальные энергозатраты в пневмоприводе соответствуют значениям параметров дополнительного объема: $p_{ак}=5 \cdot 10^5$Па и $V_{ак}=210 \cdot 10^{-6}$м^3.

Максимальное давление рекуперации в дополнительный объем достигается при начальных параметрах дополнительного объема: $V_{ак}=42 \cdot 10^{-6}$м^3 и $p_{ак}=5 \cdot 10^5$Па.

Максимальная скорость выходного звена пневмопривода достигается при начальных параметрах дополнительного объема: $p_{ак}=5 \cdot 10^5$Па и $V_{ак}=210 \cdot 10^{-6}$ м^3.

Выводы:

1) Максимальное быстродействие пневмопривода достигается при начальных параметрах дополнительного объема: $p_{ак}=5 \cdot 10^5$Па и $V_{ак}=42 \cdot 10^{-6}$м^3.

2) Минимальным энергозатратам соответствуют начальные параметры дополнительного объема: $p_{ак}=2 \cdot 10^5$Па и $V_{ак}=210 \cdot 10^{-6}$м^3.

Библиографический список

1. Mohd Yusop, M. Y. Energy Saving for Pneumatic Actuation using Dynamic Model Prediction: Submitted for the degree of PhD / M. Y. Mohd Yusop; School of Engineering. Cardiff University. – Wally, UK, 2006. – 212 p.
2. Rahmat M. F. Review on modeling and controller design in pneumatic actuator control system / M. F. Rahmat, N. H Sunar and Sy Najib Sy Salim, Mastura Shafinaz Zainal Abidin , A. A Mohd Fauzi and Z. H. Ismail // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 4, no. 4, pp.630–661, 2011.
3. Vladislav Blagojevic. Cost effectiveness of restoring energy in execution part of pneumatic system / Vladislav Blagojevic, Dragan Šešlija and Miodrag Stojiljkovic // Journal of Scientific & Industrial Research. Vol. 70, February 2011, pp. 170–176.
4. Yong Zhu, Eric J. Barth. An Energetic Control. Methodology for exploiting the passive dynamics of pneumatically actuated hopping//Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 130, pp. 041004-1…041004-10, 2008.
5. Евдокимов, А. И. Энергосберегающие пневматические приводы технологических машин / А. И. Евдокимов, Е. Б. Кривошеев, В. П. Леонова // Компрессорная техника и пневматика. — 2010. — №2. — С. 22–24.
6. Филипов, И. Б. Тормозные устройства пневмоприводов / И. Б. Филипов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 143 с.
7. Грищенко, В. И. Динамика процесса позиционирования приводов с гидроамортизатором / В. И. Грищенко, М. С. Килина, В. А. Чернавский // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 4 (65). — С. 16–21.
8. Антибас, И. Р. Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки / И. Р. Антибас, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 36–42.
9. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 8-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 232–235.
10. Антибас, И. Р. Влияние параметров плодов на их повреждения при транспортировке / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 9-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 19-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2016». — Ростов-на-Дону, 2016. — С. 79–82.
11. Сиротенко, А. Н. Рекуперация энергии в пневмоприводе фасовочно-наполнительного оборудования / А. Н. Сиротенко, А. Г. Дьяченко, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 6-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 16-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2013». — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 69–71.
12. Сиротенко, А. Н. Улучшение характеристик пневмопривода поворота платформы фасовочно-наполнительного автомата / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 8-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 179–182.

13. Дьяченко, А. Д. Улучшение характеристик пневматического привода установки для фасования и упаковки жидких продуктов / А. Д. Дьяченко, А. И. Удовкин, А. Н. Сиротенко // Совершенствование процессов и технических средств в АПК : сб. науч. трудов. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации. Азово-Черном. гос. агроинженер. акад. — Зерноград, 2006. — С. 79–81.

14. Герц, Е. В. Динамика пневматических систем машин / Е. В. Герц. — Москва : Машиностроение, 1985. — 265 с.

15. Sirotenko A.N. Decrease in Power Inputs in Pneumodrive Weighing-and-Packing Machine/ A.N. Sirotenko, S.A. Partko //International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — V. 12, № 14, P. 4599–4603.

16. Сиротенко, А. Н. Энергосберегающий пневмопривод технологического оборудования / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. статей VI науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 173–177.

17. Сиротенко, А. Н. Рекуперация энергии в пневмоприводе поворота платформы фасовочно-наполнительного автомата / А. Н. Сиротенко, А. Г. Дьяченко, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 7-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 122–124.

References

1. Mohd Yusop, M.Y. Energy Saving for Pneumatic Actuation using Dynamic Model Prediction: Submitted for the degree of PhD. School of Engineering. Cardiff University. Wally, UK, 2006, 212 p.

2. Rahmat, M.F., Sunar, N.H, and Sy Najib Sy Salim, Mastura Shafinaz Zainal Abidin, Mohd Fauzi, A.A. and Ismail, Z.H. Review on modeling and controller design in pneumatic actuator control system. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2011, vol. 4, no. 4, pp.630–661.

3. Blagojevic, V., Šešlija, D., Stojiljkovic, M. Cost effectiveness of restoring energy in execution part of pneumatic system. Journal of Scientific & Industrial Research, February 2011, vol. 70, pp. 170-176.

4. Yong Zhu, Eric J. Barth. An Energetic Control. Methodology for exploiting the passive dynamics of pneumatically actuated hopping. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2008, vol. 130, pp. 041004-1…041004–10.

5. Evdokimov, A.I., Krivosheyev, E.B., Leonova, V.P. Energosberegayushchie pnevmaticheskie privody tekhnologicheskikh mashin. [Energy saving pneumatic drives for technological machinery.] Compressor Technology and Pneumatics, 2010, no. 2, pp. 22–24 (in Russian).

6. Filipov, I.B. Tormoznye ustroystva pnevmoprivodov. [Break assemblies of pneumatic drives.] Moscow: Mashinostroenie, 1987, 143 p. (in Russian).

7. Grishchenko, V.I., Kilina, M.S., Chernavskiy, V.A. Dinamika protsessa pozitsionirovaniya privodov s gidroamortizatorom. [Positioning dynamics of drive gears with hydroabsorber.] Vestnik of DSTU, 2012, vol. 12, no. 4 (65), pp. 16–21 (in Russian).

8. Antipas, I.R., Partko, S.A., Sirotenko, A.N. Vliyanie formy gofrirovannogo kartona na amortiziruyushchie svoystva upakovki. [Effect of corrugated cardboard shape on the packing damping properties.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 1 (84), pp. 36–42 (in Russian).

9. Antypas, I.R., Partko, S.A. Sravnenie amortiziruyushchikh svoystv gofrirovannoy kartonnoy upakovki raznoy struktury pri deystvii vertikal'noy nagruzki. [Comparison of damping properties of corrugated cardboard packaging of different structures under vertical loading.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 8-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 18-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2015». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 8th Int. Jubilee Sci.-Pract. Conf. within framework of the 18th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2015”.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 232-235 (in Russian).

10. Antypas, I.R., Partko, S.A. Vliyanie parametrov plodov na ikh povrezhdeniya pri transportirovke. [Effect of fruit parameters on their damage in transit.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 9-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 19-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2016». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 9th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of the 19th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2016”.] Rostov-on-Don, 2016, pp. 79–82 (in Russian).

11. Sirotenko, A.N., Dyachenko, A.G., Partko, S.A. Rekuperatsiya energii v pnevmoprivode fasovochno-napolnitel'nogo oborudovaniya. [Energy recovery in pneumatic drive of packing and filling equipment.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 6-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 16-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2013». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 6th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of the 16th Int. Agroindustrial Exhibition “Interagromash-2013”.] Rostov-on-Don, 2013, pp. 69–71 (in Russian).

12. Sirotenko, A.N., Partko, S.A. Uluchshenie kharakteristik pnevmoprivoda povorota platformy fasovochno-napolnitel'nogo avtomata. [Improvement of characteristics of pneumatic drive of packing-filling machine platform turn.]

Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 8-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 18-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2015». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of the 18th Int. Agroindustrial Exhibition "Interagromash-2015".] Rostov-on-Don, 2015, pp. 179–182 (in Russian).

13. Dyachenko, A.G, Udovkin, A.I., Sirotenko, A.N. Uluchshenie kharakteristik pnevmaticheskogo privoda ustanovki dlya fasovaniya i upakovki zhidkikh produktov. [Improving characteristics of pneumatic drive unit for packaging liquid products.] Sovershenstvovanie protsessov i tekhnicheskikh sredstv v APK: cb. nauch. trudov. [Perfection of processes and technical means in agroindustrial complex: coll.of sci.papers.] Ministry of Agriculture and Food, RF. Azov-Black Sea State Agro-Engineering Academy, Zernograd, 2006, pp. 79–81 (in Russian).

14. Gerts, E.V. Dinamika pnevmaticheskikh sistem mashin. [Dynamics of machine pneumatic systems.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 265 p. (in Russian).

15. Sirotenko, A.N., Partko, S.A. Decrease in Power Inputs in Pneumodrive Weighing-and-Packing Machine. International Journal of Applied Engineering Research, 2017, vol. 12, no. 14, pp. 4599–4603.

16. Sirotenko, A.N., Partko, S.A. Energosberegayushchiy pnevmoprivod tekhnologicheskogo oborudovaniya. [Energy-saving pneumatic drive of process equipment.] Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii i metallurgii: sb. statey VI nauch.-prakt. konf. [Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy: Proc. VI Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2014, pp. 173–177 (in Russian).

17. Sirotenko, A.N., Dyachenko, A.G., Partko, S.A. Rekuperatsiya energii v pnevmoprivode povorota platformy fasovochno-napolnitel'nogo avtomata. [Energy recovery in pneumatic drive of packing-filling machine platform turn.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 7-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 17-y Mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2014». [State and prospects of agricultural machinery development: Proc. 7th Int. Sci.-Pract. Conf. within framework of the 17th Int. Agroindustrial Exhibition "Interagromash-2014".] Rostov-on-Don, 201, pp. 122–124 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.05.2017
Сдана в редакцию 12.05.2017
Запланирована в номер 17.09.2017

Received 12.05.2017
Submitted 12.05.2017
Scheduled in the issue 17.09.2017

Об авторах:

Сиротенко Андрей Николаевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

Партко Светлана Анатольевна,
старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Саед Бакир Аля,
доцент кафедры «Прикладная механика» Алеппо университета, доктор технических наук (Сирия, Алеппо, Алеппо университет)
Imad12sb@gmail.com

Authors:

Sirotenko, Andrey N.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), ORCID:
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9956-1032
andsirotenko@yandex.ru

Partko, Svetlana A.,
senior lecturer of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Cand.Sci. (Eng.), ORCID:
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8568-0716
parlana@spark-mail.ru

Saed Bakir Ala,
associate professor of the Applied Mathematics Department, University of Aleppo (Syria, Aleppo), Dr.Sci. (Eng.)
Imad12sb@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-822:621.646.93:621.98-04 10.23947/1992-5980-2017-17-4-77-82

Модернизация соединений трубопроводов в машинах и оборудовании нефтегазовых промыслов*

Х. К. Кадеров[1], С. О. Киреев[2], М. В. Корчагина[3], С. Л. Никишенко[4]**

[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Modernization of pipe joints in machines and equipment of oil and gas fields***

Kh. K. Kaderov[1], M. V. Korchagina[2], S. O. Kireev[3], S. L. Nikishenko[4]**

[1, 2, 3, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассматривается проблема герметичного соединения трубопроводов и рукавов высокого давления (РВД), применяемых в различных областях жизнедеятельности человека. Особенность эксплуатации трубопроводов высокого давления в оборудовании нефтегазового комплекса заключается в следующем. При температуре окружающей среды ниже минус 50 ℃ необходимо пропускать тысячи тонн пластовой жидкости, нагретой до 200–250 ℃ и содержащей агрессивные среды, абразив и сильно минерализованную воду.

Материалы и методы. Рассматриваются различные конструкции металлических уплотнителей, применяемых в соединениях трубопроводов высокого давления. Соединения, широко используемые для трубопроводов, не выдерживают давления выше 20–60 Мпа. При этом в трубопроводах нефтепромышленного оборудования давление может превышать 100 МПа. Особенностью использования рассматриваемых соединений является снижение их прочности с увеличением диаметра. Указанные недостатки ограничивают использование перечисленных схем уплотнения. Ремонт таких соединений в полевых условиях, например, при эксплуатации нефтегазового оборудования, практически невозможен. В данном случае требуется применение быстроразъемных соединений (БРС), для разборки которых достаточно наличия ключей.

Результаты исследования. Для решения указанных проблем создана и запатентована принципиально новая схема уплотнения соединения трубопроводов и РВД. Основным элементом запатентованного устройства является ступенчатая втулка, позволяющая надежно герметизировать соединение трубопроводов и РВД. Ступенчатая втулка (уплотнитель) должна быть изготовлена из высоколегированной стали по аналогии с прокладкой во фланцевых соединениях и может быть закалена, что позволит увеличить прочность рассматриваемых соединений и эксплуатировать их в условиях низких температур.

Обсуждение и заключение. Сравнительный анализ конструкций уплотнительных элементов показывает преимущества предлагаемого уплотнителя. Для его практического применения необходимо выполнить оптимизацию формы и размеров ступенчатой втулки с целью обеспечения герметичности при заданных давлениях, а также определить необходимую силу затяжки резьбы для обеспечения надежной работы узла.

Introduction The problem of tight joint of pipelines and high pressure hoses (HPH) applied in various fields of human livelihood is considered. Special aspects of the high-pressure pipelines operation in the equipment of the oil and gas complex is as follows. At ambient temperatures below minus 50ºC, it is needed to transmit thousands of tons of stratum fluids heated up to 200-250ºC and containing aggressive media, abrasive and highly mineralized water.

Materials and Methods. Various designs of metal seals applied in high pressure pipe connections are considered. Joints widely used for pipelines do not withstand pressures higher than 20-60 MPa. With that, in pipelines of the oil-industry equipment, pressure may exceed 100 MPa. A key feature of applying joints in question is to reduce their strength with increasing the diameter. These detriments confine the scope of use of the above-mentioned sealing schemes. It makes field repair of such joints, for example, during operation of oil and gas equipment, practically impossible. In this case, the use of quick connectors (Q/C) is required, for disassembling of which it is ample to have the keys.

Research Results. For the solution to the specified problems, a principally new scheme of connection sealing for pipelines and HPH is developed and patented. The key element of the patented device is a stepped bushing which reliably seals the connection of pipelines and HPH. The stepped bushing (sealant) should be made of high-alloy steel by analogy with the joint in the flange couplings, and it can be hardened which will allow for increasing the strength of the connections in question and using them under low temperature conditions.

Discussion and Conclusions. The comparative analysis of the sealing elements designs shows advantages of the proposed sealant. For its practical application, it is needed to optimize the shape and dimensions of the stepped bush in order to provide for leaktightness at given pressures, and, besides, to determine the required thread pull force to ensure safe performance of the unit.

*Работа выполнена по договору № 135 от 01.09.2014 г. «Разработка комплекта конструкторской документации на блок манифольдов для гидроразрыва пласта».

**Email: spu-45.2@dstu.ru, ms.korchaginamv@mail.ru, kireevso@yandex.ru, nikish1947@mail.ru

***The research is done within the frame of Contract No. 135 of 01.09.2014 “Development of design documentation set on hydrofrac manifold block”.

Ключевые слова: быстроразъемные соединения, трубопроводы высокого давления, соединения трубопроводов.

Keywords: quick connectors, high pressure lines, pipeline connections.

Образец для цитирования: Модернизация соединений трубопроводов в машинах и оборудовании нефтегазовых промыслов / Х. К. Кадеров [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 77–82.

For citation: Kh.K. Kaderov, M.V. Korchagina, S.O. Kireev, S.L. Nikishenko. Modernization of pipe joints in machines and equipment of oil and gas fields. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 77–82.

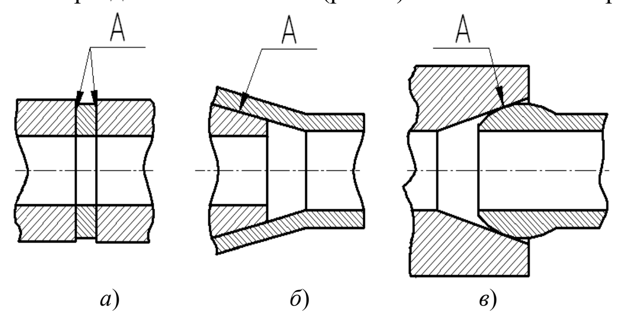
Введение. Трубопроводы и рукава высокого давления (РВД) применяют для транспортировки продуктов в жидком, газообразном и твердом состояниях. Их используют как для производственной деятельности, так и для удовлетворения потребительских нужд. Трубопроводы и РВД являются составной частью гидравлических передач, которые успешно конкурируют с механическими в качестве приводов: они бесшумны, компактны и обладают достаточно высоким коэффициентом полезного действия [1].

Кроме того, трубопроводы, их соединения являются важным компонентом в машинах и оборудовании нефтегазового промысла: в процессе транспортировки они пропускают через себя тысячи тонн пластовой жидкости, нагретой до 200–250 ºС и содержащей агрессивные среды (H_2S и CO_2), абразив и сильно минерализованную воду. При этом температура окружающей среды может быть ниже минус 50 ºС. Следует отметить также, что трубопроводы испытывают на себе воздействие высокого давления — до 70–105 МПа [2, 3].

В процессе эксплуатации трубопроводов нередко возникает проблема уплотнения соединений. Некачественные уплотнения являются причиной утечки продуктов горения, что приводит к пожарам, взрывам и может иметь катастрофические последствия. Многочисленные новации в решении указанной проблемы подтверждают ее актуальность и необходимость работы в этом направлении.

Материалы и методы. Основной характеристикой уплотнения соединений трубопроводов является их способность обеспечивать герметизацию при заданных давлениях. Величина давления в трубопроводах колеблется в широких пределах: в сантехнике и для транспортировки смазки, как правило, ограничивается величиной 1 МПа, а в машинах и оборудовании нефтегазового промысла может превышать 100 МПа. Высоким считается давление от 10 МПа [4, 5]. Соответственно, для различных условий эксплуатации применяются разные конструкции и материалы уплотнений (резина, пластмассы, металл и др.).

В представленной работе будут рассмотрены конструкции металлических уплотнителей. Соединения с металлическими уплотнителями в основном разделяют на паяные (рис. 1) и беспаечные — резьбовые.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Паяные соединения

Fig. 1. Blown joints

На рис. 1, *а* показан метод уплотнения с помощью прокладок, изготовленных из сплавов цветных металлов (алюминия, меди и др.). Такие уплотнители достаточно надежны, но требуют высоких удельных давлений в зонах контакта А (зоны герметизации на рис. 1 и 2). Это приводит к износу, пластическому деформированию прокладок, вследствие чего их приходится заменять.

На рис. 1, *б* показана схема уплотнения «конус - конус». Для достижения эффекта уплотнения необходимо, чтобы герметизирующие поверхности были изготовлены с высокой точностью и низкой шероховатостью.

Схема уплотнения «сфера — конус», изображенная на рис. 1, *в*, до сих пор широко применяется, что обусловлено простотой конструкции. Здесь эффект уплотнения, как и в схеме на рис. 1, *а*, достигается за счет высоких давлений, обеспечиваемых линейным контактом на границе «сфера – конус», что приводит к износу контактных поверхностей и потере их герметизирующих свойств.

Среди паяных соединений наиболее распространена схема «сфера - конус» (рис. 1, *в*), которую рекомендуется применять при давлениях не более 20 Мпа [4].

В отечественной и зарубежной практике широко применяются резьбовые соединения с врезающимися кольцами (рис. 2).

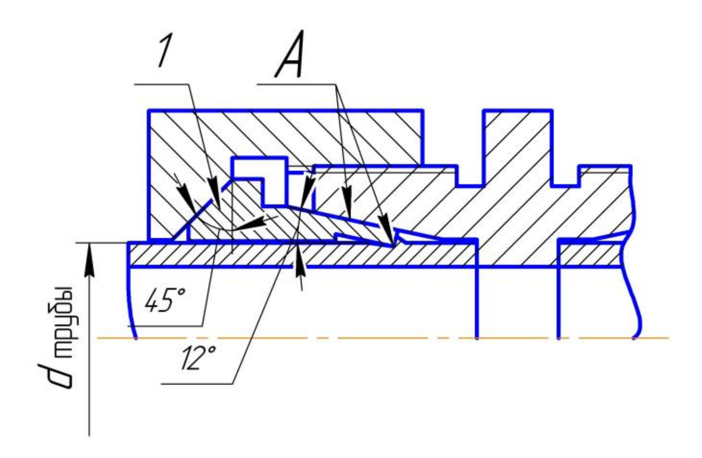


Рис. 2. Соединение с врезающимся кольцом

Fig. 2. Connection with cut ring

Конструкция и технология врезающихся колец постоянно обновляются. Конструкция кольца на рис. 2 стандартизована ГОСТ 23354-78 [5, 6] и, как правило, предусматривает изготовление его механической обработкой из круглого проката. Однако существуют и другие конструкции, например штампованные из листовых заготовок или ленты [7–10].

В соединениях с врезающимися кольцами (см. поз. 1 на рис. 2), согласно ГОСТ 23354-78, давление ограничивается величиной 60 Мпа [5]. И это не случайно: давление в трубах создает осевую силу, пропорциональную квадрату площади торца трубы.

Равновесие поддерживается сопротивлением слоя кольцевой поверхности трубы канавки, созданной врезающимся кольцом на наружной поверхности трубы или ниппеля. При этом глубина канавки, согласно проведенным опытам, составляет 0,05–0,1 мм. Испытания показали, что с увеличением диаметра трубы и, соответственно, толщины ее стенки глубина канавки практически остается постоянной и рост сил сопротивления срезу можно с достаточной точностью рассчитать в линейной пропорции.

Отсюда вывод: с увеличением до определенных значений диаметра трубы и толщины ее стенки (при достаточно высоком давлении) напряжения в слое врезки превысят предельно допустимые, что приведет к разрушению и разгерметизации соединения.

На заводе «Ростсельмаш» на рубеже XXI столетия внедрялись уплотнения соединений трубопроводов гидравлических передач зерноуборочных комбайнов — врезающиеся кольца. Для соединений трубопроводов с наружными диаметрами 8, 12 и 20 мм были проведены стендовые испытания, в результате которых установлено, что разрушение труб и ниппелей соответствовало диаметрам и давлениям: 8 мм — 150–160 МПа, 12 мм — 100 МПа и 20 мм — 70–80 МПа. Толщина стенок труб составляла соответственно 1; 1,2 и 1,6 мм. Полученные данные подтверждают вышесказанное.

Вместе с тем врезающиеся кольца применяют в определенных случаях для диаметров свыше 30 мм.

Соединения с перечисленными видами уплотнений, как правило, подвергаются вибрационным нагрузкам, поэтому их приходится часто ремонтировать. Для замены уплотнителя — как в паяных соединениях, так и с врезающимся кольцом — требуется специальное оборудование. В паяных соединениях удаляется бракованный уплотнитель и припаивается новый, а для замены врезающегося кольца необходимо отрезать часть трубопровода. Установка нового кольца связана с соблюдением требований [5] и применением определенной оснастки. Указанные недостатки ограничивают использование перечисленных схем уплотнения. Ремонт таких соединений в полевых условиях, например, при эксплуатации нефтегазового оборудования, практически невозможен. Здесь требуется применение быстроразъемных соединений (БРС), для разборки которых достаточно наличия ключей.

Результаты исследования. Для решения указанных проблем создана и запатентована принципиально новая схема уплотнения соединения трубопроводов и РВД [10], представленная на рис. 3.

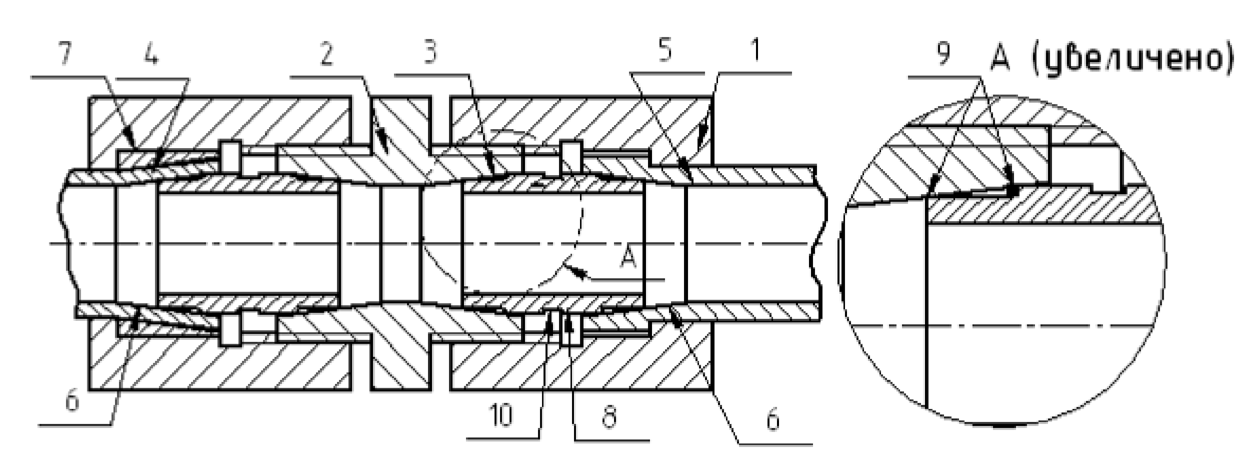


Рис. 3. Конструкция соединения трубопроводов и РВД: 1 — накидная гайка; 2 — штуцер с внутренними поверхностями 3; 4 — трубопровод; 5 — ниппель; 6 — конические поверхности трубопровода 4 и ниппеля 5; 7 — бандажное кольцо; 8 — ступенчатая втулка с уплотняющими кромками 9 и монтажной проточкой 10

Fig. 3. Design of connection of pipelines and HPH: 1 – sleeve nut; 2 – choke with inside surfaces 3; 4 – pipeline; 5 – nipple; 6 – conical surfaces of pipeline 4 and nipple 5; 7 – sleeve tube; 8 – stepped bushing with sealing lips 9 and mounting turning 10

Основным элементом запатентованного устройства является ступенчатая втулка 8, позволяющая надежно герметизировать как соединение трубопроводов, так и РВД.

Запатентованное устройство работает следующим образом. При сборке устройства в ниппель 5 и трубопровод 4 вставляют ступенчатые втулки 8, сопрягая уплотняющие кромки 9 с коническими поверхностями 6 ниппеля 5 и трубопровода 4. Затем с помощью накидных гаек 1 свинчивают штуцером 2 ниппель 5 и трубопровод 4 со вставленными втулками 8, прижимая кромки 9 ступенчатой втулки 8 к внутренним поверхностям штуцера 2 и ниппеля 5 до достижения герметичности соединения. Для замены втулки 8 достаточно развинтить накидные гайки 1 и штуцер 2. В случае заклинивания втулки 8 ее расклинивают с помощью проточки 10. Для удобства сборки и разборки втулку 8 намагничивают. Бандажное кольцо 7 предусматривает унификацию накидной гайки 1. Если нет необходимости поддерживать унификацию, можно выполнить ее как одно целое с бандажным кольцом. В формуле и описании изобретения указано, что уплотняющие кромки могут быть как острыми, так и скругленными.

Предлагаемая конструкция обладает следующими преимуществами:

а) ремонтопригодность;

б) ступенчатая втулка содержит четыре уплотняющие кромки, что повышает ее позиционирующие и функциональные свойства;

в) для сборки и разборки не требуется специальная оснастка.

Конструкция нефтегазового оборудования предусматривает большое количество соединенных участков трубопроводов. Это относится и к манифольду, представляющему собой совокупность трубопроводов и запорных устройств, обеспечивающих течение жидкости от одного или нескольких источников в нужном направлении [2].

Для соединения участков трубопроводов в манифольдах применяют соединение со специальной резьбой. Пример конструкции представлен на рис. 4.

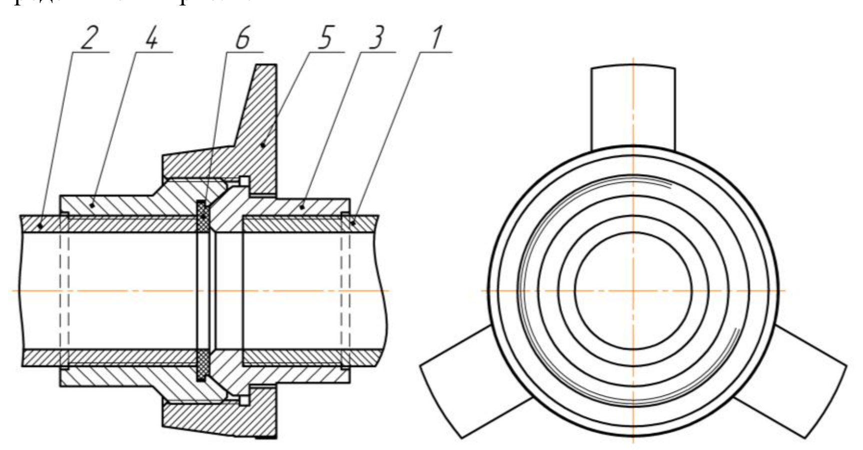


Рис. 4. Резьбовая конструкция трубопровода: 1 — соединение; 2 — трубопровод; 3 — конус уплотнения; 4 — гнездо уплотнения; 5 — крыльчатая накидная гайка; 6 — прокладка

Fig. 4. Threading pipeline design: 1 – connection; 2 – pipeline; 3 – seal plug; 4 – seal housing; 5 – wing sleeve nut; 6 – joint

Герметизация обеспечивается приложением осевой силы, величина которой учитывает давление в трубопроводе, материал и размеры прокладки, а также надежность резьбового соединения. В качестве материала применяют специальную резину и полимеры. Для надежности затяжки соединения используют специальную трапецеидальную резьбу.

Необходимо отметить еще один немаловажный фактор: при низких температурах (от минус 50 ºС) резиновые и пластмассовые (например, фторопластовые) уплотнители теряют заданные свойства и не могут поддерживать герметизацию в соединении. Предлагаемая конструкция в этом случае не теряет свои функциональные свойства.

Запатентованное устройство предусматривает работу как с острыми, так и со скругленными уплотняющими кромками. Острые могут повреждать коническую полость трубопровода. Применение острых кромок предпочтительнее, когда и ступенчатая втулка, и сопрягаемые с ней детали подвержены закалке. В данном случае утолщение концевой части трубы достигается приваркой к ней втулки и, соответственно, исключает закалку. В то же время ступенчатая втулка (уплотнитель) должна быть изготовлена из высоколегированной стали по аналогии с прокладкой во фланцевых соединениях [2] и может быть закалена.

Обсуждение и заключение. Сравнение существующей конструкции соединения трубопроводов (рис. 4) с предлагаемой (рис. 3) в достаточной мере выявляет преимущества последней. Однако для практического применения изобретения [10] в соединениях трубопроводов необходимо решить следующие задачи.

1. Оптимизировать форму и размер ступенчатой втулки (подобной представленной на рис. 3) и сопряженной с ней полостью трубопроводов с целью обеспечения герметичности при заданных давлениях.

2. Определить необходимую силу затяжки резьбы при условии создания напряжений на контакте уплотняющих кромок, не превышающих предела текучести материала трубопровода.

Библиографический список

1. Кадеров, Х. К. Моделирование формы уплотнительных элементов гидравлических соединений / Х. К. Кадеров, А. С. Юдин // Современные проблемы механики сплошной среды : тр. V междунар. конф. 12–14 октября 1999 года. — Ростов-на-Дону : Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. — Т. 2. — С. 129–133.

2. Молчанов, А. Г. Машины и оборудование для добычи нефти и газа / А. Г. Молчанов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Альянс, 2010. — 588 с.

3. Самоустанавливающийся сборный плунжер : патент 166353 Рос. Федерация : F04B 53/14, F04B 15/04 / С. О. Киреев [и др.]. — № 2016102010/06 ; заявл. 21.01.16 : опубл. 20.11.16, Бюл. № 32. — 2 с.

4. Анурьев, В. И. Справочник конструктора машиностроителя. Т. 3 / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2001. — 864 с.

5. Соединения трубопроводов: справочник / Л. П. Колесникова [и др.]. — Москва : Изд-во стандартов, 1988. — 336 с.

6. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л. А. Кондаков [и др.] ; под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1994. — 445 с.

7. Соединение трубопровода : патент 2119607 Рос. Федерация : C1 F16L 19/00 / Х. К. Кадеров [и др.]. — № 97111112/06 ; заявл. 01.07.97 ; опубл. 27.09.98, Бюл. № 27. — 6 с.

8. Соединение трубопроводов : патент 2180067 Рос. Федерация : C1 7 F16L 19/08 / Х. К. Кадеров [и др.]. — № 2000131811/06 ; заявл. 18.12.2000 ; опубл. 27.02.02, Бюл. № 6. — 5 с.

9. Соединение трубопроводов : патент 2374547 Рос. Федерация : F16 L19/08 / Х. К. Кадеров [и др.]. — № 2008124037/06 ; заявл. 18.12.2000 ; опубл. 27.11.09, Бюл. № 33. — 7 с.

10. Соединение трубопроводов : патент 236888 Рос. Федерация : C1 7 F16L 19/00 / Х. К. Кадеров [и др.]. — № 2008148071/06 ; заявл. 05.12.08 ; опубл. 20.04.10, Бюл. № 6. — 9 с.

References

1. Kaderov, Kh.K., Yudin, A.S. Modelirovanie formy uplotnitel'nykh elementov gidravlicheskikh soedineniy. [Modeling the shape of sealing elements of hydraulic connections.] Sovremennye problemy mekhaniki sploshnoy sredy: tr. V mezhdunar. konf. 12–14 oktyabrya 1999 goda. [Modern problems of continuum mechanics: Proc. V Int. Conf., 12-14 October, 1999.] Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2000, vol. 2, pp. 129–133 (in Russian).

2. Molchanov, A.G. Mashiny i oborudovanie dlya dobychi nefti i gaza. [Machines and equipment for oil and gas production.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Alyans, 2010, 588 p. (in Russian).

3. Kireev, S.O., et al. Samoustanavlivayushchiysya sbornyy plunzher: patent 166353 Ros. Federatsiya: F04B 53/14, F04B 15/04. [Self-adjusting ready-made plunger.] Utility Model Patent RF, no. 166353, 2016 (in Russian).

4. Anuryev, V.I. Spravochnik konstruktora mashinostroitelya. T. 3. [Reference book for designer-mechanical engineer. Vol. 3.] Zhestkova, I.N., 8th revised and enlarged ed. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 864 p. (in Russian).

5. Kolesnikova, L.P., et al. Soedineniya truboprovodov: spravochnik. [Pipeline connections: Reference book.] Moscow: Izd-vo standartov, 1988, 336 p. (in Russian).

6. Kondakov, L.A., et al. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: spravochnik. [Seals and compaction machinery: Reference book.] Golubev, A.I., Kondakov, L.A., eds. 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Mashinostroenie, 1994, 445 p. (in Russian).

7. Kaderov, Kh.K., et al. Soedinenie truboprovoda: patent 2119607 Ros. Federatsiya: C1 F16L 19/00. [Pipeline connection.] Patent RF, no. 2119607, 1998 (in Russian).

8. Kaderov, Kh.K., et al. Soedinenie truboprovodov: patent 2180067 Ros. Federatsiya: C1 7 F16L 19/08. [Connection of pipelines.] Patent RF, no. 2180067, 2002 (in Russian).

9. Kaderov, Kh.K., et al. Soedinenie truboprovodov: patent 2374547 Ros. Federatsiya: F16 L19/08. [Connection of pipelines.] Patent RF, no. 2374547, 2009 (in Russian).

10. Kaderov, Kh.K., et al. Soedinenie truboprovodov: patent 236888 Ros. Federatsiya: C1 7 F16L 19/00. [Connection of pipelines.] Patent RF, no. 236888, 2010 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.05.2017
Сдана в редакцию 12.05.2017
Запланирована в номер 17.09.2017

Received 12.05.2017
Submitted 12.05.2017
Scheduled in the issue 17.09.2017

Об авторах:

Кадеров Хайдярь Кадерович,
доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4177-0808
spu-45.2@donstu.ru

Киреев Сергей Олегович,
заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9352-3852
kireevso@yandex.ru

Корчагина Марина Валерьевна,
доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7092-7176
ms.korchaginamv@mail.ru

Никишенко Сергей Леонидович,
доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5670-2632
nikish1947@mail.ru

Authors:

Kaderov, Khaydyar K.,
associate professor of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand. Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4177-0808
spu-45.2@donstu.ru

Kireev, Sergey O.,
head of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9352-3852
kireevso@yandex.ru

Korchagina, Marina V.,
associate professor of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand. Sci. (Eng.),
ORCID:http://orcid.org/0000-0001-7092-7176
ms.korchaginamv@mail.ru

Nikishenko, Sergey L.,
associate professor of the Oil and Gas Complex Machinery and Equipment Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5670-2632
nikish1947@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.793.14 10.23947/1992-5980-2017-17-4-83-88

Нанесение окрашенных декоративных покрытий на поверхность конструкционных сталей*

С. М. Липкин[1], С. В. Кучеренко[2], И. Ю. Жукова[2], М. В. Колчина[2]**

[1]Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ), г. Новочеркасск, Российская Федерация
[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Application of colored decorative coatings on structural steels surface ***

S. M. Lipkin[1], S. V. Kucherenko[2], I. Y. Zhukova[2], M. V. Kolchina[2]**

[1] South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Химическая декоративная обработка стали заключается в окрашивании стальных изделий и нанесении на поверхность оксидных пленок для создания привлекательного вида и защиты изделия от ржавчины. Окрашивание водными растворами органических соединений меди обладает особенностью: окраска покрытия меняется в зависимости от времени выдержки в растворе, что связано с изменением толщины формирующегося оксидного слоя, в котором возникают явления интерференции. Для широкого применения данного способа необходимы исследования связи режимов окрашивания с получаемым цветом покрытия.

Целью настоящей работы является установление связи между окраской покрытия, получаемого из щелочных медьсодержащих растворов, и их количественным и качественным фазовым составом.

Материалы и методы. Фазовый состав получаемых покрытий исследовали методом локального электрохимического анализа (ЛЭА), основанного на катодном восстановлении оксидных фаз покрытий в гальваноимпульсном режиме с помощью датчика прижимной конструкции. В полученных импульсных хронопотенциограммах рассматривали значения потенциала в момент паузы и сопоставляли эти значения со стандартными потенциалами различных редокс-пар оксидов меди.

Результаты исследования. Анализируемые покрытия формировались в течение разного времени выдержки образца в растворе и имели разную окраску. Данные редокс-пары соответствуют: $[Cu(OH)_4]^{2-}/Cu$ — адсорбционному слою гидроксокупрат-анионов на поверхности электроосажденной на сталь меди; $Cu(OH)_2/Cu$ — адсорбционному слою гидроксида меди на поверхности электроосажденной меди; Cu_2O/Cu — оксидной пленке оксида меди (I) на меди. Это позволяет сделать вывод о составе цветных покрытий на исследованных образцах. Коричневая, фиолетовая и синяя пленки, формирующиеся в начальный период выдержки медного покрытия в растворе, содержат адсорбированные гидроксокупрат и гидроксид меди. Голубая, желтая и сиреневая пленки, формирующиеся более длительное время, содержат кроме этих фаз оксид меди (I).

Обсуждение и заключение. Из полученных данных следует, что управление временем смены окраски, необходимое в раз-

Introduction. Chemical decorative treatment of steel consists in painting steel products and applying oxide films to the surface to create an attractive appearance and prevent the product from rust. Staining copper organic compounds with aqueous solutions has the following feature: the coating color varies depending on the resistance time in solution, which is associated with changing in thickness of the forming oxide layer where interference phenomena occur. For a wide application of this method, studies are needed to investigate the relationship between the staining modes and the resulting coating color. The work objective is to establish relationship between the coating staining obtained from alkaline copper-containing solutions and their quantitative and qualitative phase composition.

Materials and Methods. The phase composition of the coatings obtained was studied by the method of local electrochemical analysis (LEA) based on the cathodic reduction of the oxide phases of the coatings in the galvanopulse mode using a clamp sensor. From the obtained impulse chronopotentiograms, the potential values at the pause moment were considered, and then these values were compared to the standard potentials of various redox pairs of copper oxides.

Research Results. The analyzed coatings were formed during different time of holding the sample in solution and had a different color. The data of the redox pair correspond to: $[[Cu(OH)_4]^{2-}/Cu$ — adsorption layer of hydroxocuprate-anions on the surface of electrodeposited copper steel; $Cu(OH)_2/Cu$ — adsorption layer of copper hydroxide on the surface of electrodeposited copper; Cu_2O/Cu — oxide film of copper oxide (I) on copper. This equates to conclude about the colored coatings composition on the samples studied. Brown, violet and blue films formed during the initial period of exposure of the copper coating in solution contain adsorbed hydroxocuprate and copper hydroxide. Blue, yellow and lilac films formed over a longer period of time contain, in addition to these phases, copper oxide (I).

Discussion and Conclusions. From the data obtained, it follows that the management of the color change time required in various

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: lipkin@yandex.ru, Kuh-sv82@mail.ru, iyuzh@mail.ru, kaufman.maria-cat@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

личных технологических приложениях, может осуществляться за счет изменения концентрации сульфата меди, а также органического восстановителя. На механизм окрашивания покрытий оказывают влияние адсорбционные слои, формирующиеся на поверхности стали. Изменяя время выдержки образца в электролите, можно управлять фазовым составом адсорбционных слоев, а, следовательно, влиять на окрашиваемость покрытия.

technological applications can be carried out through changing the concentration of copper sulfate, as well as an organic reducing agent. The mechanism of coating coloration is affected by the adsorption layers formed on the steel surface. By varying the aging time of the sample in the electrolyte, it is possible to control the phase composition of the adsorption layers, and, consequently, influence the coating colorability.

Ключевые слова: полихромные покрытия, декоративное окрашивание, локальный электрохимический анализ, сталь, электролит, явление интерференции, фазовый состав, время выдержки, сульфат меди, хронопотенциограмма.

Keywords: polychromatic coatings, decorative painting, local electrochemical analysis, steel, electrolyte, phenomenon of interference, phase composition, exposure time, copper sulfate, chronopotentiogram.

Образец для цитирования: Нанесение окрашенных декоративных покрытий на поверхность конструкционных сталей / С. М. Липкин [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 83–88.

For citation: S.M. Lipkin, S.V. Kucherenko, I.Y. Zhukova, M.V. Kolchina. Application of colored decorative coatings on structural steels surface. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 83–88.

Введение. Окрашивание металла является важным этапом производства многих видов металлопродукции. Оно формирует художественно-декоративный вид изделия, а также обеспечивает требуемую отражательную способность, защитные свойства и пр. [1–4]. Перспективными методами являются химическое и электрохимическое окрашивание металлов. Их преимущество — получение оригинальной цветовой гаммы покрытия за счет влияния явлений интерференции в тонких пленках, образующихся на окрашенной поверхности. Этот вид окрашивания может осуществляться:

— введением в раствор, применяемый для обработки поверхности, окислителей металлов (например, таких солей, как нитрит и нитрат натрия) [5, 6];

— электроосаждением на катоде [5, 6];

— анодированием [7–10].

Электрохимическое окрашивание можно проводить при различных режимах и в электролитах разного состава, например:

— электролитах, содержащих гипосульфит как окислитель и реагент для образования сульфида железа;

— аммиак с молибдатом аммония;

— уксуснокислый ацетат свинца с гипосульфитом.

Однако окрашивание в этих растворах отличается нестабильностью [1, 5]. Значительно более перспективными представляются способы окрашивания в растворах, содержащих сульфат меди и гидроксид натрия с органическими восстановителями, которые дают большое количество цветов в зависимости от времени обработки окрашиваемой поверхности [6].

Особенность окрашивания водными растворами органических соединений меди — периодическая смена окраски покрытия в зависимости от времени выдержки в растворе. Окраску связывают с изменением толщины формирующегося оксидного слоя на поверхности электроосажденной металлической меди:

$$Cu + CuSO_4 + 2NaOH = Cu_2O + Na_2SO_4 + H_2O.$$

В оксидном слое возникают явления интерференции, обусловливающие разную окраску в зависимости от толщины оксидной пленки, которая, в свою очередь, зависит от времени взаимодействия электроосажденного покрытия с ионами меди (II), находящимися в растворе. При этом, однако, не учитываются многие другие процессы, возможные в данной системе:

— образование адсорбционных слоев гидроксида меди (II) на поверхности медного покрытия и оксидной пленки;

— образование продуктов взаимодействия органического восстановителя (сахар) с гидроксидом меди;

— контактный обмен железа с ионами меди через поры образующегося покрытия.

В связи с этим картина цветообразования формирующихся покрытий может быть сложнее. Поэтому исследование механизмов образования цвета является актуальным и необходимым для оптимизации и управления процессом окрашивания. Известны трудности исследования тонкослойных покрытий методом рентгенофазового анализа. Значительные преимущества в этом отношении имеют электрохимические методы фазовой идентификации, основанные на восстановлении составляющих оксидных покрытий. При этом потенциал восстановления позволяет провести качественную идентификацию, а время восстановления дает возможность оценки той или иной фазы.

Целью настоящей работы является установление связи между окраской покрытия, получаемого из щелочных медьсодержащих растворов, и количественным и качественным фазовым составом формируемого покрытия.

Материалы и методы. Для приготовления 1 л электролита было взято 60 г (0,38 моль) сульфата меди, 90 г (0,26 моль) сахара и 45 г (1,13 моль) гидроксида натрия. Плотность раствора электролита 1,10 г/см^3 при 16° С. Анод — медь, катодом являлась покрываемая стальная деталь. Режим нанесения покрытия: температура электролита 25–40° С; катодная плотность тока 0,01 А/дм^2. Изделие погружали в ванну и выдерживали под током в течение 1 мин, затем ток отключали и выдерживали деталь в электролите для нанесения покрытия (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Зависимость окраски покрытий от времени выдержки образца в электролите

Dependence of coating staining on time of sample exposure in electrolyte

№ образца	Время нанесения медного покрытия, мин	Цвет покрытия	Фазовые составляющие покрытия
1	2	Коричневый	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$
2	2–3,5	Фиолетовый	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$
3	3,5–5,5	Синий	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$
4	6,5–8,5	Голубой	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$,Cu_2O
5	8,5–12	Желтый	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$,Cu_2O
6	12–13	Сиреневый	$[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$,Cu_2O

Фазовый состав получаемых покрытий исследовали методом локального электрохимического анализа (ЛЭА), основанного на катодном восстановлении оксидных фаз покрытий в гальваноимпульсном режиме с помощью датчика прижимной конструкции (площадь контакта с исследуемой поверхностью 0,5 мм^2). Для метода ЛЭА в качестве электролита использовали раствор гидроксида калия концентрацией 0,1 моль/л. Режим поляризации представлял собой последовательность импульсов тока, чередующихся с паузами. Длительность импульса составляла 1,5 с, паузы — 0,3 с. На каждом последующем импульсе амплитуда увеличивалась на 4 мкА, начиная с этого значения. Количество импульсов — 30. Из полученных импульсных хронопотенциограмм рассматривали значения потенциала в момент паузы и сопоставляли эти значения со стандартными потенциалами различных редокс-пар оксидов меди [7]. Количество соответствующих фаз определяли по длине участка (рис. 1), находящегося в выделенном диапазоне потенциалов.

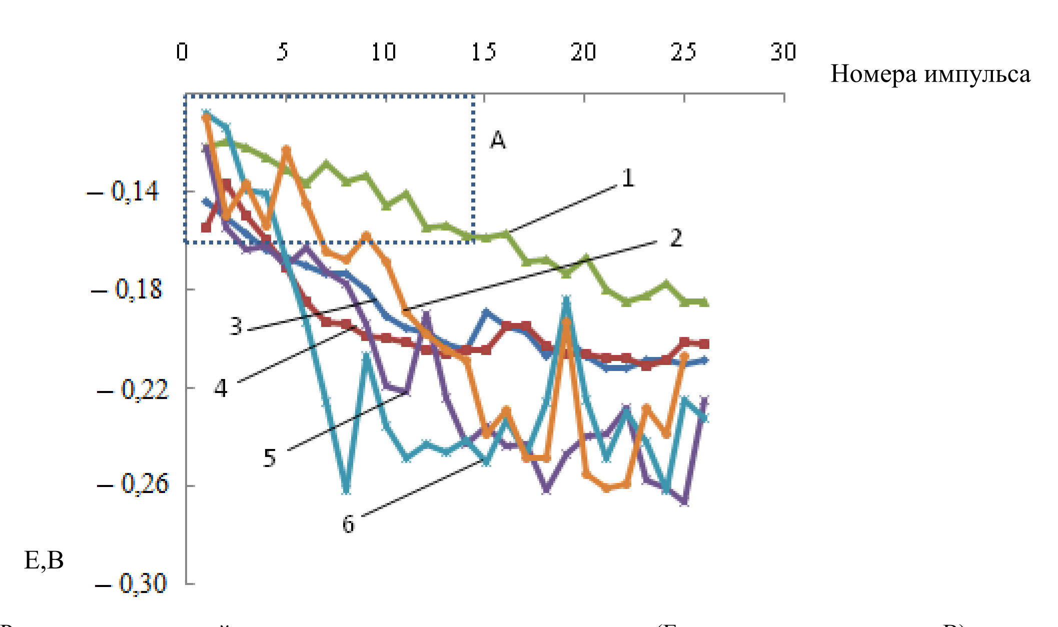


Рис. 1. Результаты измерений в моменты окончания пауз потенциалов (Е, измеряется в вольтах — В) исследуемых образцов с покрытиями разных цветов: 1 —синего, 2 — сиреневого, 3 — коричневого, 4 — фиолетового, 5 — голубого, 6 —желтого

Pic. 1. Measurement results at the terminal time of potentials pauses (E, measured in volts–B) of test samples with coatings of different colors: 1–blue, 2–lilac, 3–brown, 4–violet, 5–blue, 6–yellow

Например, для покрытия синего цвета протяженность участка в интервале потенциалов –0,1÷–0,16 В ограничивается номером импульса, который соответствует достижению потенциала –0,16 В (зона А на рис. 1).

Обсуждение и результаты. Анализируемые покрытия формировались в течение разного времени выдержки образца в растворе и имели разную окраску (табл. 1).

На рис. 1 представлены результаты измерений потенциалов покрытий исследуемых образцов в моменты окончания пауз, полученные с помощью метода ЛЭА.

Как следует из полученных данных, в покрытиях присутствуют в разных соотношениях 3 вида фаз ($[Cu(OH)_4]^{2-}$, $Cu(OH)_2$, Cu_2O), восстанавливающихся в диапазонах потенциалов –0,1 ÷–0,16 В, –0,16 ÷–0,22 В и – 0,22 ÷ –0,26 В (относительно нормального водородного электрода (н. в. э.) [7]. Имеющиеся нерегулярности связаны с неупорядоченным расположением фаз по глубине покрытия. С выделенными диапазонами потенциалов можно сопоставить следующие редокс-потенциалы пар оксидов и гидроксидов меди.

Диапазон –0,1 ÷–0,16В: $[Cu(OH)_4]^{2-} + 2e = Cu + 4OH^-$; $E^0 = -0132$ В.

Диапазон –0,16 ÷–0,23 В: $Cu(OH)_2 + 2\bar{e} = Cu + 2OH^-$; $E^0 = -0{,}226$ В.

Диапазон менее –0,23 В: $Cu_2O + H_2O + 2\bar{e} = 2Cu + 2OH^-$; $E^0 = -0{,}365$ В.

Данные редокс-пары соответствуют:

— $[Cu(OH)_4]^{2-}/Cu$ — адсорбционному слою гидроксокупрат-анионов на поверхности электроосажденной на сталь меди;

— $Cu(OH)_2/Cu$ — адсорбционному слою гидроксида меди на поверхности электроосажденной меди;

— Cu_2O/Cu — пленке оксида меди (I) на меди.

Таким образом, можно сделать вывод о составе цветных покрытий на исследованных образцах. Коричневая, фиолетовая и синяя пленки, формирующиеся в начальный период выдержки медного покрытия в растворе, содержат адсорбированные гидроксокупрат и гидроксид меди (II) (см. табл. 1). Голубая, желтая и сиреневая пленки, формирующиеся более длительное время, содержат кроме этих фаз оксид меди (I). Это соответствует определенной последовательности стадий формирования покрытий:

— электроосаждение меди;

— образование адсорбционных слоев на электроосажденном покрытии из гидроксокупрата и гидроксида меди (II);

— взаимодействие адсорбционных слоев с органическим восстановителем (медленно) с образованием оксида меди (I).

Относительное количество каждой из идентифицированных фаз рассчитывалось в единицах длины участка восстановления (количество точек, принадлежащих интервалам потенциалов восстановления, N_i) и в относительных единицах (долях по отношению к общей длине кривой восстановления, X_i):

$$X_i = \frac{N_i}{\sum N_i}.$$

Результаты расчетов вместе с длиной волны, соответствующей цвету покрытия, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Состав цветных покрытий

Color coating composition

Характеристики окрашенных покрытий		Количество фаз покрытия в единицах					
Цвет	Соответствующая длина волны, нм	длины участка восстановления, N_i			относительных, X_i		
		$Cu(OH)_2$	$[Cu(OH)_4]^2$	Cu_2O	$Cu(OH)_2$	$[Cu(OH)_4]^2$	Cu_2O
Коричневый	602,5	23	3	0	0,885	0,115	0
Фиолетовый	415	22	4	0	0,846	0,154	0
Синий	465	13	13	0	0,5	0,5	0
Голубой	495	7	6	13	0,269	0,231	0,5
Желтый	580	5	2	19	0,192	0,077	0,731
Сиреневый	480	8	9	9	0,308	0,346	0,346

Как следует из приведенных данных, связь количества фаз с длиной волны целесообразно рассматривать для двух групп: содержащих оксид меди (I) и не содержащих его. Для группы «голубой, желтый, сиреневый» окраску формирует оксид меди (I), образующийся за счет восстановления $Cu(OH)_2$ и $[Cu(OH)_4]^{2-}$ органическим восстановителем. Длина волны, соответствующая цвету покрытия, определяется относительным количествомCu_2O. Формирование окраски покрытия адсорбированным комплексом меди на начальных стадиях процесса происходит, по-видимому, за счет смешивания цвета слоя электроосажденной меди с цветом адсорбционных слоев $Cu(OH)_2$ и $[Cu(OH)_4]^{2-}$, в связи с чем длина волны, соответствующая цвету покрытия, зависит от относительного количества гидроксокомплекса.

Из полученных данных следует, что управление временем смены окраски, необходимое в различных технологических приложениях, может осуществляться за счет изменения концентрации сульфата меди, а также органического восстановителя.

Выводы. На механизм окрашивания покрытий в электролите оказывают влияние адсорбционные слои, формирующиеся на поверхности стали. Изменяя время выдержки стального образца в щелочном медьсодержащем элек-

тролите, можно управлять фазовым составом адсорбционных слоев, и, следовательно, влиять на окрашиваемость покрытия.

Библиографический список

1. Шлугер, М. А. Гальванические покрытия в машиностроении / М. А. Шлугер, Л. Д. Тока. — Москва : Машиностроение, 1985. — 248 с.

2. Способ нанесения цветного защитно-декоративного покрытия с рисунком : патент 2154124 Рос. Федерация : C23C14/04 / И. И. Колесова, М. Д. Парфенов. — № 97100079/02 ; заявл. 06.01.97 ; опубл. 10.08.2000, Бюл. № 22. — 3 с.

3. Decorative Coatings of Crystallite Type on Metallic and Non-metallic Surfaces / M. S. Satayev [et al.] // Asian journal of chemistry. — 2013. — Vol. 25, № 18. — P. 10329–10331.

4. Способ нанесения декоративных медных покрытий : заявка на изобретение Рос. Федерация : C25D 3/38 / Г. Н. Шутик [и др.]. — № 2000111796/02 ; опуб. 10.04.02. — 1 с.

5. Дасоян, М. А. Технология электрохимических покрытий / М. А. Дасоян. —Москва : Машиностроение, 1989. — 391 с.

6. Вансовская, К. М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / К. М. Вансовская ; под ред. П. М. Вячеславова. — Ленинград : Машиностроение, 1985. — 103 с.

7. Кучеренко, С. В. Химическое окрашивание стали как декоративная обработка покрытия / С. В. Кучеренко, И. С. Иванина, Ю. А. Абраменко // Новая наука: современное состояние и пути развития. — 2015. — № 6-3. — С. 183–186.

8. Чумакова, Е. А. Оксидирование изделий из нержавеющих сталей для их интерференционного окрашивания / Е. А. Чумакова, Р. А. Мирзоев, И. К. Боричева // Тр. Санкт-Петербургского политехн. ун-та Петра Великого. — 2009. — № 510. — С. 62–69.

9. Износостойкое декоративное черное покрытие на титановых сплавах, получаемое методом микродугового оксидирования / А. Г. Ракоч [и др.] // Изв. высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2016. — № 1. — С. 44–50.

10. Износостойкие защитно-декоративные покрытия на алюминии и его сплавах / А. Н. Болотов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. — 2010. — № 3. — С. 179–181.

References

1. Shluger, M.A., Toka, L.D. Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroenii. [Galvanic coatings in mechanical engineering.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 248 p. (in Russian).

2. Kolesova, I.I., Parfenov, M.D. Sposob naneseniya tsvetnogo zashchitno-dekorativnogo pokrytiya s risunkom: patent 2154124 Ros. Federatsiya: C23C14/04. [Method of applying color protective and decorative coating with pattern.] Patent RF, no. 2154124, 2000 (in Russian).

3. Satayev, M.S., et al. Decorative Coatings of Crystallite Type on Metallic and Non-metallic Surfaces. Asian journal of chemistry, 2013, vol. 25, no. 18, pp. 10329–10331.

4. Shutik, G.N., et al. Sposob naneseniya dekorativnykh mednykh pokrytiy: zayavka na izobretenie Ros. Federatsiya: S25D 3/38. [Method of applying decorative copper coatings.] Application for Invention RF, no. C25D 3/38, 2002 (in Russian).

5. Dasoyan, M.A. Tekhnologiya elektrokhimicheskikh pokrytiy. [Electrochemical coatings technology.] Moscow: Mashinostroenie, 1989, 391 p. (in Russian).

6. Vansovskaya, K.M. Metallicheskie pokrytiya, nanesennye khimicheskim sposobom. [Chemically applied metallic coatings.] Vyacheslavov, P.M., ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 103 c. (in Russian).

7. Kucherenko, S.V., Ivanina, I.S., Abramenko, I.A. Khimicheskoe okrashivanie stali kak dekorativnaya obrabotka pokrytiya. [Chemical staining of steel as decorative coating treatment.] New Science: Current State and Development Trends, 2015, no. 6-3, pp. 183–186 (in Russian).

8. Chumakova, E.A., Mirzoev, R.A., Boricheva, I.K. Oksidirovanie izdeliy iz nerzhaveyushchikh staley dlya ikh interferentsionnogo okrashivaniya. [Oxidation of articles made of stainless steels for their interference staining.] Proc. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 2009, no. 510, pp. 62–69 (in Russian).

9. Rakoch, A.G., et al. Iznosostoykoe dekorativnoe chernoe pokrytie na titanovykh splavakh, poluchaemoe metodom mikrodugovogo oksidirovaniya. [Wear-resistant black decorative coating produced by the plasma electrolytic oxidation method on titanium alloys.] Powder Metallurgy and Functional Coatings, 2016, no. 1, pp. 44–50 (in Russian).

10. Bolotov, A.N., et al. Iznosostoykie zashchitno-dekorativnye pokrytiya na alyuminii i ego splavakh. [Wear-resistant protective and decorative coatings on aluminum and its alloys.] Mechanics and physics of processes on surface and in contact of solids, parts of production and power equipment, 2010, no. 3, pp. 179–181 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.06.2017
Сдана в редакцию 23.06.2017
Запланирована в номер 21.09.2017

Received 22.06.2017
Submitted 23.06.2017
Scheduled in the issue 21.09.2017

Об авторах:

Липкин Семен Михайлович,
доцент кафедры «Автоматика и Телемеханика» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) (РФ, 346400, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 1), кандидат технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8311-8124
lipkin@yandex.ru

Кучеренко Светлана Викторовна,
доцент кафедры «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат химических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0731-6513
Kuh-sv82@mail.ru

Жукова Ирина Юрьевна,
заведующая кафедрой «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2781-4528
iyuzh@mail.ru

Колчина Мария Викторовна,
студентка кафедры «Химических технологий нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5424-4364
kaufman.maria-cat@yandex.ru

Authors:

Lipkin, Semen M.,
associate professor of the Automation and Telemechanics Department, South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk (RF, 346400, Novocherkassk, ul. Prosveshcheniya, 1), Cand.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8311-8124
lipkin@yandex.ru

Kucherenko, Svetlana V.,
associate professor of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Chemistry), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0731-6513
Kuh-sv82@mail.ru

Zhukova, Irina Y.,
head of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2781-4528
iyuzh@mail.ru

Kolchina, Maria V.,
student of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5424-4364
kaufman.maria-cat@yandex.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.75 10.23947/1992-5980-2017-17-4-89-96

Разработка и применение системы распределенных вычислений в решении обратных задач механики разрушений*

А. Н. Соловьев[1], П. В. Васильев[2], Л. А. Подколзина[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Development and application of distributed computing system in inverse problems of fracture mechanics***

A. N. Soloviev[1], P. V. Vasiliev[2], L. A. Podkolzina[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. При решении задач, требующих обработки большого объема данных, возникает проблема получения решения за приемлемое время. Одним из способов выполнения ограничения на временной ресурс является разделение всего объема вычислений между несколькими центрами обработки данных. Следовательно, задача разработки методов повышения быстродействия вычислительных систем и эффективности их использования является актуальной. В настоящей работе рассматривается разработка системы распределенных вычислений для обеспечения решения обратных задач в области механики разрушений. Целями работы являются проектирование и расчетно-экспериментальное обоснование системы для решения узко специализированного типа задач. В работе применяются такие программные комплексы как *ANSYS*, *COMSOL* и *FlexPDE*.

Материалы и методы Предложена методология, позволяющая использовать в качестве центров обработки обычные ПК, а не специализированные машины с предустановленным аппаратным обеспечением. Система не накладывает особых требований к аппаратной части компьютеров. Для функционирования системы необходима связь между ПК. Наличие качественной высокоскоростной сети является желательным, так как это упрощает процесс развертывания системы и увеличивает производительность вычислительного процесса. Проведен расчет конечно-элементной модели с большим набором параметров.

Результаты исследования. Разработано новое программное обеспечение для обеспечения решения обратных задач в области механики разрушений. Реализована возможность использования системы для решения более широкого спектра задач. Были учтены особенности аналогичного ПО с целью повышения отказоустойчивости и уменьшения издержек, не связанных с решением задачи. Исполняющий модуль системы проводит вычисления в многопоточном режиме, поэтому аппаратные возможности вычислительных средств используются максимально рационально. Простота организации формата хранения данных и передачи их по сети позволила достигнуть наиболее оптимального использования доступных ресурсов.

Обсуждение и заключения. Разработанная система распределенных вычислений применена при проведении конечно-

Introduction. When solving problems that require processing of a large amount of data, the problem of obtaining a solution in an acceptable time arises. One of the ways to implement a time-resource constraint is to split the entire amount of computing between several data centers. Therefore, to develop methods to improve the speed of computing systems and the effectiveness of their use is an important task. The paper deals with the development of a distributed computing system to provide solutions to inverse problems in the field of fracture mechanics. The work objectives are the design, and calculation and experimental justification of the system for solving an ad-hoc type of tasks. Such software packages as ANSYS, COMSOL, and FlexPDE are used in the work.

Materials and Methods. A methodology is proposed that allows for the use of ordinary PCs as processing centers, rather than specialized machines with preinstalled hardware. The system does not impose any special requirements on the hardware. For the system operation, the communication between PCs is necessary. The availability of the high-quality high-speed network is desirable. This simplifies the process of the system deployment, and increases the productivity of the computing process. A finite element model with a large set of parameters is calculated.

Research Results. New software is developed to provide solutions to inverse problems in the field of fracture mechanics. The opportunity to use the system for solving a wider range of tasks is realized. Special features of similar software are taken into account in order to increase resiliency and reduce costs not related to the problem solution. The system executing module performs calculations in a multithreaded mode. Therefore, the hardware capabilities of computing tools are used with maximum efficiency. Simplicity in organizing the format of data storage and transferring them over the network made it possible to achieve the most optimal utilization of the available resources.

Discussion and Conclusions. The developed system of distributed

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00390-а
** E-mail: solovievarc@gmail.com, lyftzigen@mail.ru, podkolzinalu@gmail.com
*** The research is done on RFFI grant no. 16-01-00390-a

элементного моделирования распространения ультразвуковой волны в стенке трубы с тонким внешним покрытием. В системе предусмотрено резервное копирование данных, что позволило сократить возможные потери расчетных данных при отказе некоторых компонентов системы.

computations is used in performing finite element modeling of the ultrasonic wave propagation in the wall of a tube with a thin outer coating. The system provides a backup of data. This made it possible to reduce the possible losses of design data when some components of the system fail.

Ключевые слова: распределенные вычисления, гетерогенные системы, конечно-элементное моделирование, неразрушающий контроль, идентификация дефектов.

Keywords: distributed computing, heterogeneous systems, finite element modeling, non-destructive testing, defect identification.

***Образец для цитирования*:** Соловьев, А. Н. Разработка и применение системы распределенных вычислений в решении обратных задач механики разрушений. А. Н. Соловьев, П. В. Васильев, Л. А. Подколзина. // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 89–96.

For citation: A. N. Soloviev, P. V. Vasiliev, L.A. Podkolzina. Development and application of distributed computing system in inverse problems of fracture mechanics. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 89–96.

Введение. В течение последних десятилетий наблюдается бурный рост многопроцессорных вычислений, включая многоядерные процессоры и создание распределенных центров обработки данных. Глобальное распространение многоядерных процессоров, мощных графических процессоров и кластеров параллельных систем в совокупности с наступившем расцветом эпохи *Big Data* и интенсивным вычислением данных открыли огромные возможности по применению и использованию параллельных и распределенных вычислений. Данные тенденции привели к тому, что параллельные и распределенные вычисления стали повсеместными в компьютерной науке, в результате чего они все чаще используются в отраслях, где возникает необходимость в обработке больших массивов данных при соблюдении жестких временных ограничений. За счет того, что параллельные и распределенные вычисления производят одновременное выполнение нескольких процессов, значительно повышается скорость работы вычислительных систем. Параллельные и распределенные вычисления основаны на базовых понятиях во многих областях вычислений, включая понимание концепций фундаментальных систем, алгоритмы, языки, системы, сети и аппаратное обеспечение, а также параллелизм и параллельное выполнение, согласованность в манипуляции с состоянием, памятью и латентностью. Взаимодействие и координация между процессами задается в моделях вычислений передачи сообщений и общей памяти и таких алгоритмических концепциях, как атомарность, консенсус и условное ожидание. Одним из самых важных условий, стоящих перед вычислительными системами, является получение решения за приемлемое время. Распределение всего объема вычислений между несколькими центрами обработки данных является эффективным способом удовлетворения условия ограничения на временной ресурс [1]. Это определяет важность задачи разработки методов повышения быстродействия и эффективности вычислительных систем.

Постоянное увеличение объемов данных повышает требования к хранению данных. Так, в докладе Международной корпорации данных указывается, что к 2020 году требования к хранению превысят 40 ЗБ [2]. Развитие технологий распределенных вычислений послужило толчком к объединению географически-распределенных по миру гетерогенных ресурсов. Благодаря появлению технических возможностей для решения масштабных задач в области науки, техники и коммерции на территориально-распределенных ресурсах, принадлежащих разным владельцам, были разработаны такие системы хранения, как распределенные файловые системы *Hadoop* [3], *Cassandra* [4] и *Hive* [5], предназначенные для решения некоторых из существующих проблем путем диспергирования (распределения) больших наборов данных по кластеру машин для облегчения последующего параллельного анализа.

Поскольку объемы данных растут вместе с необходимостью своевременного извлечения знаний из них, происходит внедрение уникальных задач обеспечения ресурсов, вычислений и управления данными. Множество организаций используют компьютерные сети, объединяющие десятки и даже сотни компьютеров. С ростом таких сетей все актуальнее становится вопрос об эффективности использования вычислительных ресурсов, которые она объединяет. Зачастую имеющиеся компьютеры не загружены полностью. Поэтому для повышения эффективности следует задействовать простаивающие ресурсы для выполнения какой-либо полезной работы — например, использовать их для решения некоторой трудоемкой задачи. Решение проблем производительности, энергоэффективности и безопасности в распределенных системах позволяет эффективно применять имеющиеся ресурсы. Развитие данного направления привело к возникновению концепции *utility computing*. Данный подход заключается в объединении независимых вычислительных ресурсов с целью получения виртуального суперкомпьютера. В последние годы популярность также набирает *Jungle Computing*, представляющая собой распределенную вычислительную парадигму, основанную на одновременном сочетании различных иерархических и распределенных вычислительных сред, которые состоят из большого количества гетерогенных ресурсов. В такой вычислительной среде ресурсы и основные вычислительные и коммуникационные инфраструктуры являются высокоиерархическими и гетерогенными. Это создает сложности при выполнении поиска надлежащих ресурсов для эффективного выполнения определенных работ в системе.

Распределенные вычислительные системы часто характеризуются множеством ресурсов, которые могут быть связаны с конкретными платформами или средами. Для максимального раскрытия потенциальных возможностей использования любых типов распределенных вычислительных ресурсов принципиально важным становится использование результативных и эффективных алгоритмов планирования, используемых менеджерами ресурсов.

В настоящее время широкое распространение получили системы, поддерживающие различные вычислительные парадигмы, такие как кластерные вычисления (*Cluster Computing*), грид-вычисления (*Grid Computing*), одноранговые вычисления (*Peer-to-Peer Computing*), а также новая концепция облачных вычислений (*Cloud Computing*), каждая из которых так или иначе содержит в себе элементы неоднородности [6–7].

Анализ *GRID*-систем. Быстрое развитие новых технологий для управления информацией и извлечения знаний, оценки и слияния, а также внедрение новых вычислительных парадигм, поддерживающих такие задачи, оказывает большое влияние на создание компьютерных систем будущего. Такие вычислительные парадигмы очень важны, особенно при выполнении семантического анализа полученной информации или предоставления распределенных или удаленных услуг с учетом предпочтений пользователей и социальных требований.

Крупномасштабные распределенные вычислительные технологии, такие как суперкомпьютеры *Cloud*, *Grid*, *Cluster* и *High Performance Computing* (*HPC*), развиваются благодаря революционному появлению многоядерных проектов (*GPU*, процессоров на одном кристалле, суперкомпьютеров на чипе и т. д.) и значительных успехов в сетях и межсоединениях (*Maassen et al*., 2011). Это приводит к усложнению интеграции разнообразных вычислительных сред, инфраструктур, платформ и технологий. Суперкомпьютеры способны решать большой спектр задач, однако за счет высокой стоимости они используются в основном для проведения научных исследований. Распространение данных, доступность оборудования, гетерогенность программного обеспечения, а также огромный объем научных проблем формируют потребность в более доступных вычислительных ресурсах, создаваемых, например, соединением кластеров в *GRID*-системы.

GRID-вычисления — это новая форма распределенных вычислений, обеспечивающая передовую вычислительную и общую модель для решения объемных и вычислительно-интенсивных задач. *GRID*-вычисления используются для предоставления различных услуг пользователям через ресурсы, которые географически распределены, динамичны и разнородны по своей природе. В *GRID*-вычислениях балансировка нагрузки играет важную роль при перераспределении пользовательских заданий при перегрузке сетевых ресурсов. В последние несколько лет разработчиками было предложено множество стратегий балансировки нагрузки, с целью улучшения времени отклика, накладных расходов на связь, пропускной способности и использования ресурсов. Несомненным плюсом данных стратегий является отсутствие выделенных ресурсов и значительных дополнительных инвестиций в оборудование. *GRID*-системы на основе персональных компьютеров (ПК) являются наиболее дешевым решением, обеспечивающим сравнительно высокую производительность в несколько петафлопс, что позволяет в большинстве ресурсоемких задач заменить ими суперкомпьютеры.

В сфере программного обеспечения существует множество различных инструментариев для организации распределенных вычислений. В качестве примеров можно привести инструментарии *Globus Toolkit, Alchemi .NET Framework, X-Com, BOINC.*

Идея применения ПК при создании *GRID*-систем основана на использовании так называемых свободных ресурсов, не участвующих в работе, выполняемой пользователем вычислительного узла. В настоящее время наиболее известной открытой программной платформой, созданной исследователями университета Беркли для реализации *GRID*-вычислений, является *BOINC*. На её основе можно создавать распределенные системы локального и глобального масштаба. Система *BOINC* состоит из программного клиента, составного сервера и специализированного ПО. Для выполнения распределенных вычислений используется клиент-серверная архитектура, где связь между сервером и клиентами осуществляется через сеть Интернет.

У всех систем подобного рода есть ряд недостатков — необходимость установки и настройки на стороне клиента специализированного программного обеспечения, сложность объединения разнородных вычислительных ресурсов (таких как *GPU*, *FPGA* и т. д.) в единую распределенную систему.

При создании собственной системы распределенных вычислений с применением платформы *.NET Framework* был использован анализ требований, предъявляемых к гетерогенной системе для распределенных вычислений, а также существующие решения в области построения *GRID*-систем.

Описание работы системы распределенных вычислений. При организации совместной работы компьютеров неизбежно возникает проблема разделения задачи на вычислительные блоки между центрами обработки. Тради-

ционно она решается созданием управляющей программы. Управляющая программа закрепляет между компьютерами вычислительные блоки задачи, организовывает их совместную работу, следит за работоспособностью компьютеров, обеспечивает сбор обработанных данных [8].

Данный подход накладывает жесткие ограничения на круг выполняемых задач из-за отсутствия мобильности в процессе перенастройки компьютеров в случае необходимости выполнения ряда задач с разными вычислительными алгоритмами. К недостаткам различных вариаций такого подхода относятся неизбежные временные потери, большие затраты на разработку программ, низкая живучесть системы из-за наличия центра управления, низкая эффективность решения вычислительных блоков задач с высокой степенью связности данных.

Разработанный алгоритм позволяет использовать в качестве центров обработки не специализированные машины с необходимым предустановленным аппаратным обеспечением, а обычные ПК, что позволяет снизить затраты на организацию вычислительных мощностей. В созданной системе нет требований к быстродействию компьютеров, а также не существует ограничений на количество ПК. К необходимым условиям относится наличие физических связей между ПК для передачи данных. Пользователь системы может применять обычную компьютерную сеть, построенную по топологии, имеющей иерархическую структуру, использующей различные сетевые технологии (например, *Ethernet*). При такой конфигурации и сетевой технологии каждый ПК может обращаться к источнику входных данных по каналу связи независимо от других ПК, передавать данные и служебную информацию от одного компьютера к другому.

Система состоит из центрального модуля, который содержит набор задач, одновременно выполняемых в рамках распределенной системы вычислений. Центральный модуль выполняет ряд функций: добавление новых задач, обработка и хранение задач, распределение задач между исполняющими модулями, отображение статистики и информации о ходе выполнения задач. Центральный модуль имеет пользовательский интерфейс, благодаря которому пользователь может в интерактивном режиме взаимодействовать и управлять им, добавлять, удалять, запускать и приостанавливать задачи. Также пользователь может как в ручном, так и в автоматическом режиме произвести сбор данных, полученных в результате решения задач. В рамки обязанностей центрального модуля входит регистрация и идентификация в сети исполняющих модулей, контроль их состояния, производительности и перераспределения задач в случае отказа какого-либо из них. Модуль поддерживает шифрование и сжатие данных, передаваемых по сети. Также, в случае необходимости, возможно установить опцию, при которой центральному модулю не будут передаваться результирующие данные. В таком случае пользователь может вручную произвести сбор данных. Центральный модуль получает информацию о производительности и аппаратном обеспечении машин, на которых установлены исполняющие модули и на основании данной информации может принять решение о распределении задач.

Исполняющий модуль представляет собой программное средство, которое устанавливается на компьютер, участвующий в процессе распределённых вычислений. Данный модуль устанавливает сетевое взаимодействие с центральным модулем и в случае готовности производить расчеты запрашивает задачи. Также он контролирует ход выполнения задачи, если это позволяет тип задачи, и производит перезапуск или отмену задания, если его не удается решить по каким-либо причинам. При первой установке соединения с центральным модулем и после авторизации исполняющий модуль получает все необходимые данные для проведения расчетов, за исключением специальных средств и программных комплексов, которые могут быть установлены вручную. Также он выполняет резервное копирование данных, полученных в результате проведения расчетов. В рамках поставленной задачи резервные копи создаются на уровне файлов. Исполняющий модуль может проводить одновременный запуск нескольких подзадач. Для обеспечения целостности данных он создает среду исполнения для каждой подзадачи и контролирует их статус выполнения.

Каждая задача имеет определенное количество подзадач. Каждая задача и подзадача уникально идентифицирована в системе во избежание коллизий. Задача представляет собой директорию с определенным набором файлов, в которых содержатся конфигурационные данные, набор параметров и дополнительная информация. Помимо этого, в директории находится программное средство, предназначенное для выполнения в фоновом режиме. Это средство производит запуск и инициализацию решаемой подзадачи. Оно может быть запушено в нескольких экземплярах.

На рис. 1 показана схема взаимодействия пользователя и модулей системы распределенных вычислений.

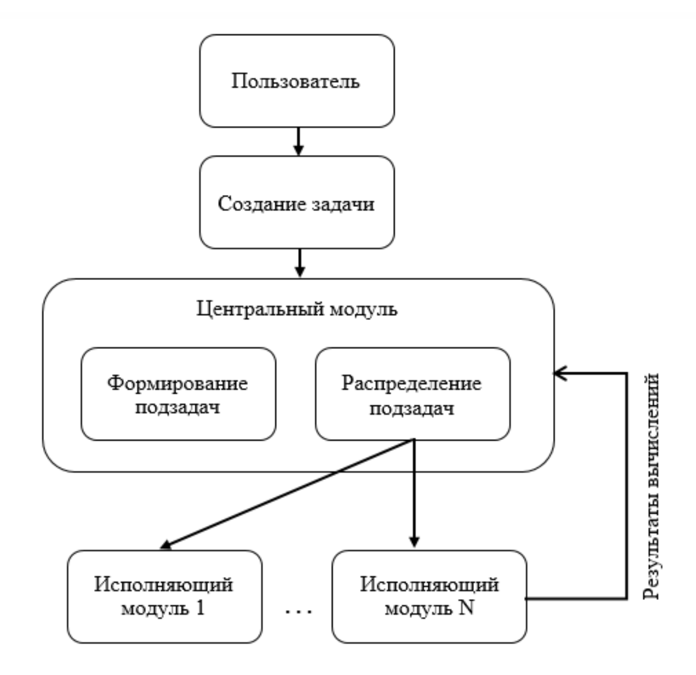


Рис. 1. Взаимодействие пользователя и модулей разработанной системы распределенных вычислений

Fig. 1. Interaction of users and modules of the developed distributed computing system

Ниже приведен алгоритм работы центрального модуля и основных его подсистем:

1. Запуск и инициализация.
2. Проверка статуса выполнения задач.
3. Проверка наличия новых задач.
4. Создание новых подзадач, если это необходимо.

Параллельно:

1. Ожидание подключения исполняемого модуля.
2. Регистрация исполняемого модуля.
3. Передача всех компонентов необходимых для решения задач.
4. Получение системной информации от исполняемого модуля.
5. Получение информации о текущих и выполненных задачах.
6. Выполнение пункта 1.

Параллельно:

1. Ожидание запроса о новой задаче от исполняемого модуля.
2. Выделение подзадачи или нескольких подзадач.
3. Выполнение пункта 1.

Параллельно:

1. Ожидание запроса на передачу данных, полученных в результате расчетов.
2. Получение данных согласно установленным параметрам.
3. Архивирование полученных данных.
4. Обновление списка выполненных подзадач и задач.
5. Оповещение исполняющих модулей о выполненных задачах.
6. Выполнение пункта 1.

Параллельно:

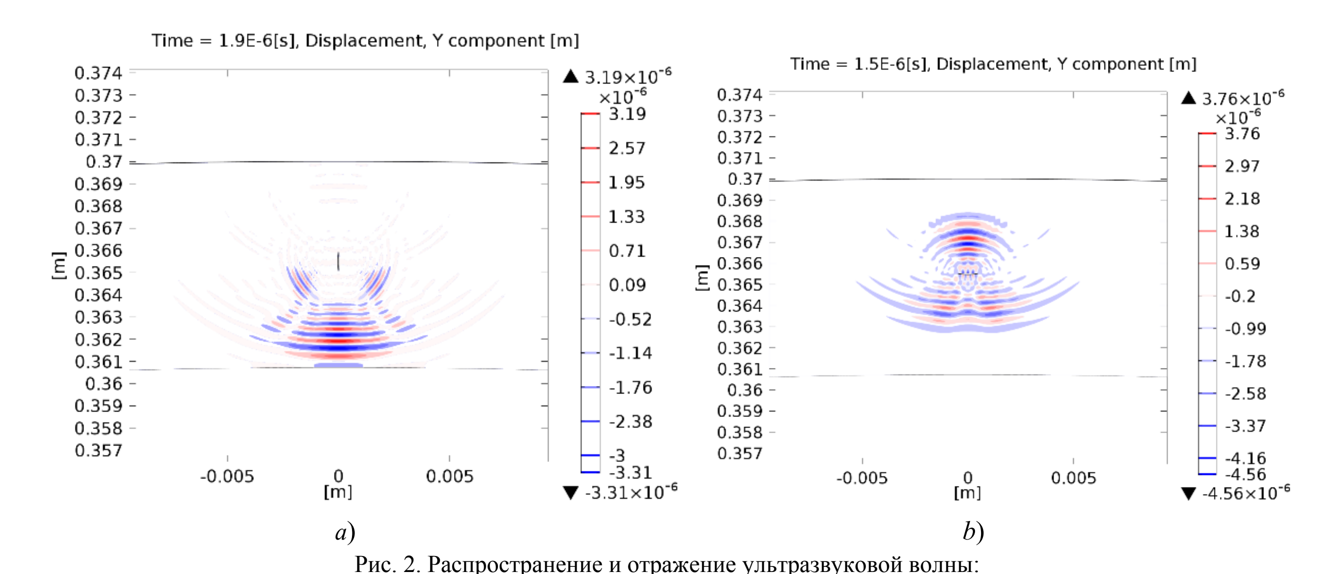
1. Проведение опроса подключенных исполняемых модулей.
2. Контроль состояния и сбор статистики модулей.
3. Перераспределение подзадач при необходимости.
4. Выполнение пункта 1.

Применение системы распределенных вычислений для решения обратных задач механики разрушений. Целью разработки системы распределенных вычислений является ускорение процесса решения большого набора ресурсоемких задач конечно-элементного моделирования и рациональное использование доступных вычислительных ресурсов. Неразрушающий контроль является неотъемлемой частью технического диагностирования и используется для оценки технического состояния узлов промышленного оборудования без применения разрушающих операций. Среди методов неразрушающего контроля ведущее положение занимает ультразвуковой контроль. Он основан на

способности звуковых волн отражаться от границы раздела двух упругих сред, обладающих разными акустическими свойствами [9–11].

Симуляция распространения ультразвуковой волны в твердых телах может быть проведена методом конечных элементов (МКЭ). В качестве инструмента исследования был выбран программный комплекс *COMSOL*. С помощью этого программного комплекса решались задачи моделирования распространения ультразвуковой волны в трубе, усиленной тонкой кольцевой накладкой.

Рассмотрим задачу идентификации дефекта с последующей его локализацией. Эта проблема относится к области неразрушающего контроля свойств и параметров объекта в обратных задачах механики деформируемого твердого тела. Возникает необходимость проведения большого количества ресурсоемких задач в ходе решения задачи идентификации дефектов. Необходимо провести расчет конечно-элементной модели с большим набором параметров. На рис. 2 проиллюстрировано распространение ультразвуковой волны при различных параметрах дефекта.



а) *b*)

Рис. 2. Распространение и отражение ультразвуковой волны:
трещина расположена вертикально (*а*);
трещина расположена горизонтально (*b*)

Fig.2. Propagation and reflection of ultrasonic wave: crack is located vertically (left); crack is located horizontally (right)

В табл. 1 указано время, которое было затрачено на работу отдельных частей системы, при этом в расчетах было задействовано 25 компьютеров.

Таблица 1
Table 1

Время, затраченное различными компонентами системы

Time spent by different components of the system

Компонент системы Component	**Среднее время работы (с) Average time (s)**
Решение задачи	1533
Передача данных по сети	1,29
Сохранение данных на диск	0,13
Код исполняющего модуля	0,98

Результаты применения системы и выводы. При применении разработанной системы распределенных вычислений был достигнут существенный прирост производительности при решении задачи конечно-элементного моделирования. Благодаря тому, что исполняющий модуль системы проводит вычисления в многопоточном режиме, аппаратные возможности вычислительных средств были использованы наиболее рационально. Простота организации формата хранения данных и передачи их по сети позволила достигнуть наиболее оптимального использования до-

ступных ресурсов. За счет применения системы резервного копирования данных удалось сократить возможные потери данных, полученных в результате расчетов, при отказе некоторых компонентов системы.

В рамках поставленной задачи эффективность применения разработанной системы распределенных вычислений составила 99.8 %, а общее время проведения расчетов сократилось в 20 раз.

Библиографический список

1. Chih-Fong Tsai, Wei-Chao Lin, Shih-Wen Ke. Big data mining with parallel computing: A comparison of distributed and MapReduce methodologies. Journal of Systems and Software, 2016, vol. 122, pp. 83–92.
2. Gantz, J. The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the Far East. IDC iView: IDC Analyze the Future, 2012, vol. 2007, pp. 1–16.
3. Shvachko, K., Kuang, H., Sanjay, R., Chansler, R. The Hadoop distributed file system. Mass Storage Systems and Technologies (MSST), 2010 IEEE 26th Symposium on, IEEE, 2010, pp. 1–10.
4. Lakshman, A., Malik, P. Cassandra – A decentralized structured storage system. ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev., 2010, vol. 44, no. 2, pp. 35–40.
5. Thusoo, A., Sarma, J.S., Jain, N., Shao, Z., Chakka, P., Anthony, S., Liu, H., Wyckoff, P., Murthy, R. Hive–A warehousing solution over a Map-Reduce framework. Proc. VLDB Endowment, 2009, vol. 2 no. 2, pp. 1626–1629.
6. Foster, I., Kesselman C., Tuecke, S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. International Journal of Supercomputer Applications and High-Performance Computing, 2001, vol. 15, no 3, pp. 200–222.
7. Frank J. Seinstra, Jason Maassen, Rob V. van Nieuwpoort, Niels Drost, Timo van Kessel, Ben van Werkhoven, Jacopo Urbani, Ceriel Jacobs, Thilo Kielmann, Henri E. Bal. Jungle computing: Distributed supercomputing beyond clusters, grids, and clouds. Grids, Clouds and Virtualization, London: Springer, 2011, pp. 167–197.
8. Таненбаум, Э. Распределенные системы: принципы и парадигмы / Э. Таненбаум. — Санкт-Петербург : Питер, 2003. — 877 с.
9. Soloviev, A.N., Sobol, B.V., Vasiliev, P.V. Ultrasonic Location of Inner Crack Defects in a Compound Elastic Cylinder Using an Artificial Neural-Network Apparatus. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 119–124.
10. Ватульян, А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твёрдого тела / А. О. Ватульян. — Москва : Физматлит, 2007. — 224 с.
11. Willcox, M.A. A Brief Description of NDT Techniques. Toronto: NDT Equipment Limited, 2003. 54 p.

References

1. Chih-Fong Tsai, Wei-Chao Lin, Shih-Wen Ke. Big data mining with parallel computing: A comparison of distributed and MapReduce methodologies. Journal of Systems and Software, 2016, vol. 122, pp. 83–92.
2. Gantz, J. The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the Far East. IDC iView: IDC Analyze the Future, 2012, vol. 2007, pp. 1–16.
3. Shvachko, K., Kuang, H., Sanjay, R., Chansler, R. The Hadoop distributed file system. Mass Storage Systems and Technologies (MSST), 2010 IEEE 26th Symposium on, IEEE, 2010, pp. 1–10.
4. Lakshman, A., Malik, P. Cassandra – A decentralized structured storage system. ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev., 2010, vol. 44, no. 2, pp. 35–40.
5. Thusoo, A., Sarma, J.S., Jain, N., Shao, Z., Chakka, P., Anthony, S., Liu, H., Wyckoff, P., Murthy, R. Hive—A warehousing solution over a Map-Reduce framework. Proc. VLDB Endowment, 2009, vol. 2 no. 2, pp. 1626–1629.
6. Foster, I., Kesselman, C., Tuecke, S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations. International Journal of Supercomputer Applications and High-Performance Computing, 2001, vol. 15, no 3, pp. 200–222.
7. Seinstra, F., Maassen, J., van Nieuwpoort, R.V., Drost, N., van Kessel, T., van Werkhoven, B., Urbani, J., Jacobs, C., Kielmann, T., Bal, H.E. Jungle computing: Distributed supercomputing beyond clusters, grids, and clouds. Grids, Clouds and Virtualization, London: Springer, 2011, pp. 167–197.
8. Tanenbaum, E. Raspredelennye sistemy: printsipy i paradigmy. [Distributed systems: principles and paradigms.] St.Petersburg: Piter, 2003, 877 p. (in Russian).
9. Soloviev, A.N., Sobol, B.V., Vasiliev, P.V. Ultrasonic Location of Inner Crack Defects in a Compound Elastic Cylinder Using an Artificial Neural-Network Apparatus. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 119–124.
10. Vatulyan, A.O. Obratnye zadachi v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. [Inverse problems in deformable solid mechanics.] Moscow: Fizmatlit, 2007, 224 p. (in Russian).
11. Willcox, M.A. A Brief Description of NDT Techniques. Toronto: NDT Equipment Limited, 2003, 54 p.

Поступила в редакцию 15.09.2017
Сдана в редакцию 15.09.2017
Запланирована в номер 20.10.2017

Received 15.09.2017
Submitted 15.09.2017
Scheduled in the issue 20.10.2017

Об авторах:

Соловьев Аркадий Николаевич,
профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554
solovievarc@gmail.com

Васильев Павел Владимирович,
старший преподаватель «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449
liftzeigen@mail.ru

Подколзина Любовь Александровна,
программист кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9476-5802
podkolzinalu@gmail.com

Authors:

Soloviev, Arkady N.,
professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics (Strength of Materials), Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554
solovievarc@gmail.com

Vasiliev, Pavel V.,
senior lecturer of the Information Technologies Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449
liftzeigen@mail.ru

Podkolzina, Lyubov A.,
programmer of the Information Technologies Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9476-5802
podkolzinalu@gmail.com

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК: 004.932.2 10.23947/1992-5980-2017-17-4-97-106

Идентификация телевизионных изображений системы технического зрения на основе математического аппарата кубических нормализованных B-сплайнов*

В. А. Крутов[1], Д. А. Безуглов[2], О. В. Швачко[3]**

[1] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Ростовская область, Российская Федерация

[2] Ростовский филиал Российской таможенной академии, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3] Федеральное казенное учреждение Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Identification of television images in vision systems based on mathematical apparatus of cubic normalized B-splines***

V. A. Krutov[1], D. A. Bezuglov[2], O. V. Shvachko[3]**

[1] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Rostov Region, Russian Federation

[2]Russian Customs Academy, Rostov Branch, Rostov-on-Don, Russian Federation

3Scientific and Production Association “Special Equipment and Telecoms”, Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена решению задачи идентификации телевизионных изображений при создании автономных роботов, систем технического зрения и систем анализа изображений с помехами. Речь идет, например, о сложных условиях наблюдения, затрудняющих процесс регистрации, и об отсутствии априорных сведений относительно вида фоновых шумов. Цель исследования — разработка и оценка эффективности метода выделения контуров изображения (двумерного сигнала) на фоне импульсных шумов с использованием математического аппарата кубических B-сплайнов.

Материалы и методы. При наличии интенсивных фоновых шумов сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов и изображений, как правило, непродуктивна и приводит к большим погрешностям. При этом метод дифференцирования строки изображения на фоне шума позволяет с достаточной точностью вычислить производную сигнала. С учетом информации о поведении первой производной определены локальные максимумы в строке изображения на фоне шума. Задача выделения контуров телевизионных изображений решена новым методом сплайн-дифференцирования. Для этого матрица изображения разбита на строки и столбцы, выполнено дифференцирование, и затем вычислены операторы выделения контуров. В отличие от известных подходов при дифференцировании учтена информация об интенсивности во всей строке изображения. Это позволяет минимизировать влияние шума. Контуры изображения определены с использованием градиента интенсивности. Полученный алгоритм сплайн-дифференцирования использован для математического моделирования.

Результаты исследования. Авторы данной работы впервые предложили высокоточный метод цифрового дифференцирования двумерных сигналов. Такой подход позволяет с достаточно высокой точностью вычислять значения производной двумерного сигнала и его градиент. При этом нет необходи-

Introduction. The solution to the problem of television images identification under the creation of autonomous robots, vision systems, and noisy image analysis systems is considered. The question is, for example, on severe observing conditions hindering the registration process, and null aprior information on the type of background noise. The work objective is to develop and evaluate the efficiency of the method for image edge detection (two-dimensional signal) against the background of pulse noise using the mathematical apparatus of cubic B-splines.

Materials and Methods. Involving intense background noise, spline-approximation of discrete values of signals and images is usually unproductive and leads to raw errors. In this case, the method of differentiating the image line against the noise background allows calculating the signal derivative with sufficient accuracy. Taking into account the information on the behavior of the first derivative, local maxima in the image line against the noise background are defined. The task of television image edge detection is solved by a new technique of spline-differentiation. For this, the image matrix is divided into lines and columns; the differentiation is performed; and then the edge extraction operators are calculated. Unlike the known approaches, the differentiation takes into account data on the intensity in the whole image line. This minimizes the noise effect. Image edges are defined using an intensity gradient. The resulting spline-differentiation algorithm is used for mathematical modeling.

Research Results. The authors of the paper for the first time propose a high-precision method of digital differentiation of two-dimensional signals. This approach allows calculating values of the two-dimensional signal derivative and its gradient with sufficiently high accuracy. With that, there is no need to use

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: rostov_don@mail.ru, bezuglovda@mail.ru, stis-rostov6@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

мости пользоваться стандартными процедурами численного дифференцирования, которые сами по себе являются некорректными.
Тестовое изображение *Lena*, искаженное импульсными шумами «битые пиксели» и «соль-перец», обработано оператором *Собеля* и методом сплайн-дифференцирования. Значения $e_{ско}$, *SNR* и *SNRF* сведены в таблицы и проанализированы. Для тестового изображения *Lena* выигрыш в децибелах составил: по СКО $e_{ско}$ — 1,6÷2,7; по отношению пиковый сигнал/шум *SNR* — 8÷9,4; по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона *SNRF* — 11÷12.
Обсуждение и заключения. В условиях стремительного развития микропроцессорной техники по-новому применяются задачи, решаемые с помощью систем технического зрения. Это подтверждает актуальность исследований в области повышения эффективности и устойчивости методов и алгоритмов цифровой обработки двумерных сигналов. Эксперименты показали, что представленный метод имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем алгоритмы, основанные на стандартных процедурах дифференцирования.

Ключевые слова: двумерный сигнал, изображение, выделение контуров, сглаживающий кубический B-сплайн, импульсный шум.

Образец для цитирования: Крутов, В. А. Идентификация телевизионных изображений системы технического зрения на основе математического аппарата кубических нормализованных B-сплайнов / В. А. Крутов, Д. А. Безуглов, О. В. Швачко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 97–106.

standard numerical differentiation procedures which are incorrect in themselves. *Lena* test image distorted by pulse noises of “dead pixels” and “salt-pepper” is processed by the *Sobel* operator and the spline-differentiation method. Values of $e_{ско}$, *SNR* and *SNRF* are tabulated and analyzed. For the *Lena* test image, the gain in decibels was as follows: according to the *MSD* (mean-square deviation) — 1.6 ÷ 2.7; relative to peak signal/*SNR* noise ratio — 8 ÷ 9.4; relative to peak signal/ *MSD* noise of *SNRF* background — 11 ÷ 12.
Discussion and Conclusions. Under the conditions of rapid development of microtechnology, the problems solved with the help of vision systems take a new way of application. This proves the relevance of research in the field of increasing the efficiency and stability of methods and algorithms for digital processing of two-dimensional signals. The experiments show that the presented technique has considerably higher noise immunity than algorithms based on standard differentiation procedures.

Keywords: two-dimensional signal, image, edge detection, smoothing cubic B-spline, pulse noise.

For citation: V.A. Krutov, D.A. Bezuglov, O.V. Shvachko. Identification of television images in vision systems based on mathematical apparatus of cubic normalized B-splines. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 97–106.

Введение. В последнее время интенсивно развиваются системы идентификации изображений. При этом значительно возрастает объем хранимой информации и ее достоверность. Соответственно, меняются требования к оперативности обработки и извлечения полезных данных из больших массивов изображений, полученных на фоне шумов различной интенсивности [1–5].

Идентификация телевизионных изображений используется в промышленности при создании автономных роботов, систем технического зрения и анализа изображений в сложных условиях наблюдения. Решению данной задачи могут мешать различные факторы, усложняющие процесс регистрации. Кроме того, отсутствуют априорные сведения о видах фоновых шумов. Это значит, что методы и алгоритмы обработки информации с датчиков изображения должны учитывать шумы различной природы. При этом известные подходы к решению таких задач предполагают предварительную фильтрацию двумерных сигналов, а затем решение задачи выделения контуров. При построении методов идентификации двумерных сигналов требуется априорное знание характеристик искажающих помех. На практике в большинстве случаев такая информация отсутствует или является приближенной. Для решения указанных задач необходимо создать новые математические методы описания и обработки двумерных сигналов, а также программное обеспечение, пригодное для решения конкретных задач [5–13].

Существующие методы и алгоритмы обработки двумерных сигналов и телевизионных изображений позволяют решить задачу достоверной обработки. При этом должно быть выполнено условие: задана априорная информация о процессе, что не всегда технически возможно [1–5]. Нетривиальным представляется решение задачи выделения контуров [4–18]. По сути, речь идет о цифровом дифференцировании двумерных сигналов, зарегистрированных на фоне шумов различной природы. Нетривиальность в данном случае обусловлена тем, что указанная задача является в общем случае некорректной. В современных информационных системах для решения задачи выделения контуров обычно используют методы численного дифференцирования или маски.

Материалы и методы. Методы, основанные на сплайнах, являются наиболее мощными средствами вычислительной математики. В практике обработки сигналов и изображений широко используется сплайн-аппроксимация их дискретных значений, что определяется свойством гладкости аппроксимирующей функции по производным на границах интервалов дискретизации [3, 4, 5].

Для выделения контуров изображений применяются различные маски, то есть, по сути, используют методы численного дифференцирования. Однако при наличии интенсивных фоновых шумов такой подход, как правило, непродуктивен и приводит к большим погрешностям [5]. Рассмотрим этот факт подробнее.

В ряде задач обработки сигналов непосредственному наблюдению доступен процесс $S(t)$, а информативным параметром является его производная $\frac{\partial S(t)}{\partial t}$. Известные методы численного дифференцирования будут удовлетворительно работать лишь для функций, заданных в точках с малой погрешностью.

Рассмотрим одно из широко используемых в практике разностных отношений для приближенного вычисления производной функции $S(t)$, например:

$$\frac{\partial S(t_k)}{\partial t} \approx S_{t,k} = \frac{S(t_k) - S(t_{k-1})}{h}, \tag{1}$$

где h — шаг, $S(t_k)$ — выборочные значения сигнала.

Возникающая в результате такой замены методическая погрешность аппроксимации характеризуется разложением:

$$S_{t,k} = \frac{\partial S(t_k)}{\partial t} - \frac{h}{2}\frac{\partial^2 S(\xi^{(j)}{}_k)}{\partial t^2}, \tag{2}$$

где $\xi^{(j)}{}_k, j = 1,2,3,$ — точки из интервала (t_{k-1}, t_{k+1}).

Погрешность, возникающая при вычислении разностных отношений, намного превосходит погрешность в задании значений функции $S(t_k)$ и даже может неограниченно возрастать при стремлении шага сетки h к нулю.

Операция численного дифференцирования в данном случае является некорректной. Это связано с тем, что для нахождения приближения $S_{t,k}$ к $\frac{\partial S(t_k)}{\partial t}$ необходимо, чтобы шаг h был малым. Задачу дифференцирования также можно решить с использованием полиномов Лагранжа, но для высокоточной аппроксимации придется использовать большие степени. Практического применения данный подход не нашел.

Применение предложенного в работах [6, 7] метода дифференцирования строки изображения на фоне шума позволяет с достаточной точностью вычислить производную сигнала. Имея информацию о поведении первой производной, можно определять локальные максимумы в строке изображения на фоне шума.

Первая производная сигнала с использованием предложенного нового метода сплайн-дифференцирования может быть найдена по следующей процедуре.

1. Выбирается коэффициент сглаживания (как правило, равен единице, при высоком уровне шума можно выбрать больший коэффициент).
2. Вычисляется матрица коэффициентов сглаживания.
3. Решается система линейных алгебраических уравнений с учетом коэффициентов сглаживания и значений входной реализации. Таким образом вычисляются коэффициенты сглаживающих кубических B-сплайнов.
4. С помощью кубических сглаживающих параболических B-сплайнов восстанавливается первая производная и исходный сигнал [6, 7].

Рассмотрим решение задачи выделения контуров телевизионных изображений с использованием нового метода сплайн-дифференцирования. Для этого матрицу изображения $S(i,j)$ разобьем на строки и столбцы, проведем дифференцирование методом, предложенным в [2], и затем вычислим операторы выделения контуров. В отличие от известных подходов при дифференцировании будет учитываться информация об интенсивности во всей строке изображения. Это позволяет минимизировать влияние шума.

Пусть задана матрица $S(i,j)$ черно-белого изображения размером $N \times N$. Примем следующие обозначения:

$$S_i = [s_{i1}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{iN}] \text{ — } i\text{-я строка матрицы;} \tag{3}$$

$$S_j = \begin{pmatrix} s_{1j} \\ \vdots \\ s_{ij} \\ \vdots \\ s_{Nj} \end{pmatrix} \text{ — } j\text{-й столбец;} \tag{4}$$

$S1_i = \frac{\partial S_i}{\partial x}$ — вектор-строка, полученная дифференцированием i-й строки матрицы $S(i,j)$;

$$\frac{\partial S(j)_i}{\partial x} = S1(j)_i \text{ — } j\text{-й элемент вектор-строки } S1_i = \frac{\partial S_i}{\partial x}; \tag{5}$$

$S1^j = \frac{\partial S^j}{\partial y}$ — вектор-столбец, полученный дифференцированием j-го столбца матрицы $s(i,j)$;

$$\frac{\partial S(i)^j}{\partial y} = S1(i)^j \text{ — } i\text{-й элемент вектор-столбца } S1^j = \frac{\partial S^j}{\partial y}. \tag{6}$$

Тогда с учетом разработанного ранее метода сплайн-дифференцирования [2] выражения для производной по строкам и столбцам могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial S_i}{\partial x}=\sum_{i=1}^{N-1}\left(\frac{\chi^2}{2h}(b_{i+2}-3b_{i+1}+3b_i-b_{i-1})+\frac{\chi}{h}(b_{i+1}-2b_i+b_{i-1})+\frac{1}{2h}(b_{i+1}-b_{i-1})\right), \tag{7}$$

$$\frac{\partial S^j}{\partial y}=\sum_{i=1}^{N-1}\left(\frac{Y^2}{2h}(b_{j+2}-3b_{j+1}+3b_j-b_{j-1})+\frac{Y}{h}(b_{j+1}-2b_j+b_{j-1})+\frac{1}{2h}(b_{j+1}-b_{j-1})\right). \tag{8}$$

Градиент интенсивности представляет собой вектор, не зависящий от выбора системы координат в том смысле, что он сохраняет свою величину и ориентацию по отношению к лежащему в основе образу, когда этот образ поворачивается или сдвигается. С использованием градиента могут быть определены контуры изображения.

Рассмотрим подробнее алгоритм сплайн-дифференцирования. Градиент интенсивности исследуемого изображения $G\,(S(I,j))$ запишем в виде:

$$G(S(i,j))=\left(\begin{gathered}\left(\sum_{i=1}^{N-1}\left(\frac{\chi^2}{2h}(b_{i+2}-3b_{i+1}+3b_i-b_{i-1})+\frac{\chi}{h}(b_{i+1}-2b_i+b_{i-1})+\frac{1}{2h}(b_{i+1}-b_{i-1})\right)\right)^2+\\ \left(\sum_{j=1}^{N-1}\left(\frac{Y^2}{2h}(b_{j+2}-3b_{j+1}+3b_j-b_{j-1})+\frac{Y}{h}(b_{j+1}-2b_j+b_{j-1})+\frac{1}{2h}(b_{j+1}-b_{j-1})\right)\right)^2\end{gathered}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{9}$$

Данный алгоритм сплайн-дифференцирования будет использован далее для математического моделирования.

Результаты исследования. Наиболее распространенными видами помех являются случайный нормально распределенный аддитивный шум и импульсный шум, статистически независимый от сигнала. Модель импульсного шума хорошо описывает помехи, возникающие при передаче цифрового сигнала.

В работе использованы перечисленные ниже количественные критерии.

1. Среднеквадратическое отклонение $e_{ско}$:

$$e_{ско}=\sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(MK_{ij}-\hat{MK}_{ij}\right)^2}. \tag{10}$$

При этом в качестве тестового изображения *MK* использовалось изображение контуров, полученное из незашумленного исследуемого изображения детектором границ *Canny*. Соответствующая процедура имеется в программном пакете *Mathcad* 14. В дальнейшем на исходное изображение *S* накладывался импульсный шум двух видов: «битые пиксели» и «соль-перец». Далее проводилось определение контуров предложенным методом сплайн-дифференцирования и известным методом *Собеля*.

2. Отношение пиковый сигнал/шум *SNR*:

$$\mu=\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(\hat{MK}_{ij}\right)^2, \tag{11}$$

$$SNR=\frac{255-\mu}{\sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{M-1}\left(\hat{MK}_{ij}-\mu\right)^2}}, \tag{12}$$

где μ — среднее значение $\hat{MK}_{ij}$.

3. Отношение пиковый сигнал/шум *SNRF* с использованием в расчетах среднеквадратического отклонения (СКО) фона:

$$SNRF=\frac{255-\mu}{\sigma_{фон}}, \tag{13}$$

$$\sigma_{фон}=\sqrt{\frac{1}{\left(N_{фон}\right)^2}\sum_{i=n_1}^{n_1+N_{фон}}\sum_{j=m_1}^{m_1+N_{фон}}\left(\hat{MK}_{ij}-\mu_{фон}\right)^2}, \tag{14}$$

$$\mu_{фон}=\frac{1}{\left(N_{фон}\right)^2}\sum_{i=n_1}^{n_1+N_{фон}}\sum_{j=m_1}^{m_1+N_{фон}}\left(\hat{MK}_{ij}\right), \tag{15}$$

где $\sigma_{фон}$ — СКО фона; $\mu_{фон}$ — среднее значение фона; n_1, m_1 — координаты выбранной площадки фона размером $N_{фон} \times N_{фон}$ на исследуемом изображении $\hat{MK}_{ij}$.

Используя эти три критерия, можно оценить эффективность предложенного алгоритма по сравнению с известными методами. Для проверки адекватности разработанного алгоритма рассмотрим его функционирование на тестовом изображении размером 512×512, не подвергшемся воздействию шума [6,7].

Суть вычислительного эксперимента состояла в следующем. Исходное изображение *Lena*, представленное на рис. 1, *а*, было обработано детектором границ *Canny* из пакета *Mathcad* 14 (рис. 1, *б*). В дальнейшем с ним будут сравниваться все полученные изображения.



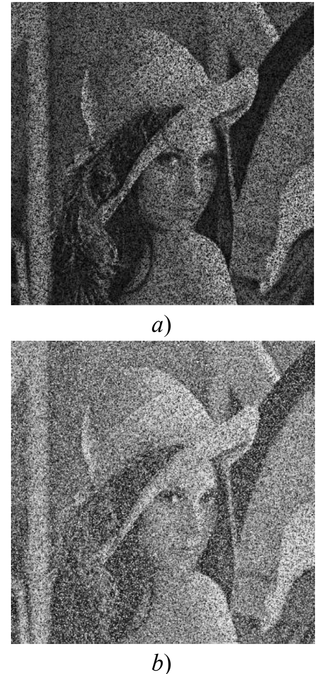
a)

b)

Рис. 1. Тестовое изображение: исходное (*a*); результат обработки тестового изображения детектором границ *Canny* (*b*)

Fig. 1. Test image: source (a); result of test image processing by Canny edge detector (b)

Затем тестовое изображение подвергалось воздействию двух видов импульсного шума: «битые пиксели» с вероятностью $p = 0,5$ (рис. 2, *а*); «соль-перец» с вероятностью $p = 0,5$ (рис. 2, *б*).



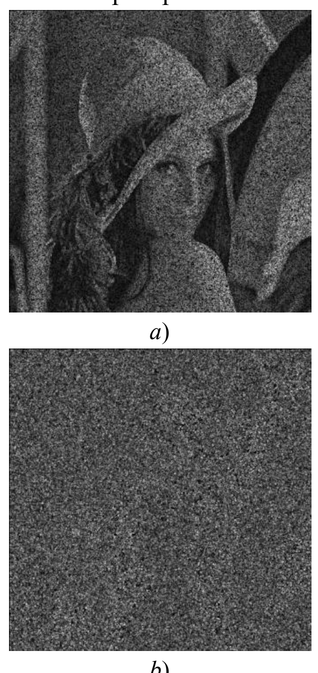
a)

b)

Рис. 2. Тестовое изображение, подвергшееся воздействию шума: «битые пиксели» (*a*); «соль-перец» (*b*)

Fig. 2. Test image exposed to noise: “dead pixels” (a); “salt-pepper” (b)

На рис. 3 приведены результаты обработки оператором *Собеля* изображений, представленных на рис. 2.



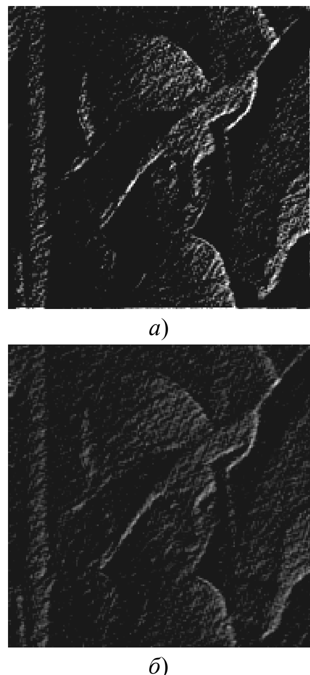
a)

b)

Рис. 3. Результаты обработки оператором *Собеля* тестового изображения, подвергшегося воздействию шума: «битые пиксели» (*a*); «соль-перец» (*b*)

Fig. 3. Results of processing test image exposed to noise: "dead pixels" (a); "salt-pepper" (b) by Sobel operator

На рис. 4 приведены результаты обработки методом сплайн-дифференцирования изображений, представленных на рис. 2.



a)

б)

Рис. 4. Результаты обработки методом сплайн-дифференцирования тестового изображения, подвергшегося воздействию шума: «битые пиксели» (*a*); «соль-перец» (*б*)

Fig. 4. Results of processing test image exposed to noise: "dead pixels" (a); "salt-pepper" (b) by spline-differentiation

Очевидно, что предложенный в работе алгоритм выделения контуров на базе сплайн-дифференцирования позволяет достаточно эффективно решить поставленную задачу. В таблицах 1, 2 приведены значения $e_{ско}$, *SNR* и *SNRF* для изображений *Lena*.

Таблица 1

Table 1

Значения $e_{ско}$, *SNR* и *SNRF* для изображения *Lena*, искаженного импульсным шумом «битые пиксели»

Values of $e_{ско}$, SNR, and SNRF for Lena image distorted by pulse noise of "dead pixels"

Критерий 1: выигрыш по среднеквадратическому отклонению $e_{ско}$, дБ									
Шум	СКО исходного изображения	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	83,42	0,96	1,5	1,56	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
1	106,01	0,7	1,43	1,55	1,64	1,65	1,65	1,65	1,65
Критерий 2: выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум *SNR*, дБ									
Шум	Отношение пиковый сигнал/шум исходного изображения	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	2,51	2,52	5,14	5,85	6,85	7,15	7,59	7,82	8,06
1	3,15	1,74	4,55	5,54	7,26	7,85	8,27	8,45	8,61
Критерий 3: выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона *SNRF*, дБ									
Шум	Отношение пиковый сигнал/шум по СКО фона	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	2,85	3,71	6,5	7,36	8,96	9,65	10,57	11,07	11,7
1	3,39	2,78	5,69	6,77	8,69	9,49	10,2	10,57	11,0

Таблица 2

Table 2

Значения $e_{ско}$, *SNR* и *SNRF* для изображения *Lena*, искаженного импульсным шумом «соль-перец»

Values of $e_{ско}$, SNR, and SNRF for Lena image distorted by pulse noise of "salt – pepper" pixels

Критерий 1: выигрыш по среднеквадратическому отклонению $e_{ско}$, дБ									
Шум	СКО исходного изображения	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	85,48	1,29	1,84	1,92	1,96	1,97	1,97	1,97	1,97
1	108,51	1,65	2,46	2,6	2,72	2,73	2,73	2,74	2,74
Критерий 2: выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум *SNR*, дБ									
Шум	Отношение пиковый сигнал/шум исходного изображения	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	1,46	3,07	5,47	6,2	7,05	7,34	7,62	7,72	7,83
1	1,21	3,47	6,05	6,89	8,44	8,72	8,98	9,2	9,37
Критерий 3: выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона *SNRF*, дБ									
Шум	Отношение пиковый сигнал/шум по СКО фона	Коэффициент сглаживания сплайн-функций							
		1	5	10	50	100	200	300	500
0,5	1,56	3,31	5,91	6,86	8,59	9,4	10,18	10,63	11,17
1	1,23	3,58	6,38	7,41	9,62	10,24	10,92	11,43	12,02

Для тестового изображения *Lena* выигрыш в децибелах составил:

- по СКО $e_{ско}$ — 1,6 ÷ 2,7;
- по отношению пиковый сигнал/шум *SNR* — 8 ÷ 9,4;
- по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона *SNRF* — 11 ÷ 12.

Таким образом, разработан и исследован новый метод выделения контуров изображений на фоне аддитивного импульсного шума с использованием математического аппарата сглаживающих кубических В-сплайнов. По сути, речь идет о возможности вычисления модуля (квадрата) градиента изображения с использованием сплайн-дифференцирования. Метод позволяет уйти от использования различных масок при выделении контуров изображений. При этом применение кубических нормализованных В-сплайнов в задаче дифференцирования двумерных сигналов имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем алгоритмы, основанные на стандартных процедурах дифференцирования.

Заключение. Эксплуатация систем технического зрения предполагает решение задач высокой сложности. Это объясняется частой сменой ситуации на исследуемой площади, разнородностью объектов, помехами и другими факторами. Выполнение высоких требований, предъявляемых к данным системам, напрямую связано с решением задачи повышения эффективности процесса цифровой обработки сигнала, регистрируемого датчиками автономных роботов. Одна из проблем априорно неизвестных условий наблюдения — наличие шума, обусловленного такими факторами, как дефекты системы регистрации, влияние окружающей среды и т. п. Предложенный впервые новый высокоточный метод цифрового дифференцирования сигналов позволяет с достаточно высокой точностью вычислять как значение самого сигнала, так и значения его производной. При этом нет необходимости использовать стандартные процедуры численного дифференцирования, которые сами по себе являются некорректными.

В условиях стремительного развития микропроцессорной техники по-новому применяются задачи, решаемые с помощью систем технического зрения. Это подтверждает актуальность исследований в области повышения эффективности и устойчивости методов и алгоритмов цифровой обработки двумерных сигналов. Экспериментальные исследования показали, что представленный в данной работе метод имеет значительно более высокую помехоустойчивость, чем алгоритмы, основанные на стандартных процедурах дифференцирования.

Библиографический список

1. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. — Москва : Мир, 1982. — 312 с.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — Москва : Техносфера, 2005. — 1104 с.
3. Алберг, Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. — Москва : Мир, 1972. — 316 с.
4. Завьялов, Ю. С. Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. JI. Мирошниченко. — Москва : Наука, 1980. — 350 с.
5. Безуглов, Д. А. Метод дифференцирования сигналов с использованием сплайн-аппроксимации / Д. А. Безуглов, В. А. Крутов, О. В. Швачко // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 4, ч. 1. — С. 24 – 28.
6. Безуглов, Д. А. Сплайн-аппроксимация в задаче дифференцирования сигналов и изображений / Д. А. Безуглов, В. А. Крутов, О. В. Швачко // Современные наукоемкие технологии. — 2017. — № 4. — С. 17–22.
7. Bezuglov, D. A. Contour detection based on wavelet differentiation / D. A. Bezuglov, A. P. Kuzin, V. V. Voronin // Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2016 : Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. — 2016. — P. 986–900.
8. Bezuglov, D. A. Method of discrete wavelet analysis of edges on the random background / D. A. Bezuglov, Y. D. Bezuglov, S. A. Shvidchenko // 22nd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision : poster papers proceedings. — Plzen, 2014. — P. 15–19.
9. Inpainting strategies for reconstruction of missing data in images and videos: Techniques, algorithms and quality assessment / V. V. Voronin [et al.] Intelligent Information Technologies for Industry : Proceedings of the First International Scientific Conference. — Sochi, 2016. — Vol. 2. — P. 163–174.
10. Безуглов, Д. А. Обработка результатов измерений на базе аппроксимации плотности распределения сглаживающими кубическими В-сплайнами / Д. А. Безуглов, П. М. Поморцев, А. В. Скляров // Измерительная техника. — 2000. — № 9. — С. 32.
11. Безуглов, Д. А. Алгоритм восстановления волнового фронта на базе двумерных сглаживающих кубических нормализованных В-сплайнов / Д. А. Безуглов, А. В. Скляров // Оптика атмосферы и океана. — 2000. — Т. 13, № 8. — С. 770.
12. Алгоритмы оценивания негауссовских процессов на основе математического аппарата сглаживающих В сплайнов / Д. А. Безуглов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. — 2005. — № S4. — С. 99–106.
13. Субоптимальный алгоритм оценивания на основе аппарата сглаживающих В-сплайнов / Д. А. Безуглов [и др.] // Измерительная техника. — 2006. — № 10. — С. 14–17.
14. Безуглов, Д. А. Информационная технология вейвлет-дифференцирования результатов измерений на фоне шума Вестник компьютерных и информационных технологий / Д. А. Безуглов, С. А. Швидченко // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2011. — № 6 (84). — С. 42–45.
15. Выделение контуров изображений в информационных и управляющих системах с использованием метода вейвлет-преобразования / Д. А. Безуглов [и др.] // Нелинейный мир. — 2012. — № 11. — С. 846–852.
16. Безуглов, Д. А. Метод вейвлет-дифференцирования в задаче выделения контуров / Д. А. Безуглов, С. Ю. Рытиков, С. А. Швидченко // Успехи современной радиоэлектроники. — 2012. — № 6. — С. 52–57.
17. Информационная технология идентификации изображений / Д. А. Безуглов [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2, ч. 16. — С. 3466–3470.

18. Безуглов, Д. А. Информационная технология выделения контуров изображений на фоне шума / Д. А. Безуглов, А. П. Кузин // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2, ч. 2. — С. 190.

References

1. Pratt, W. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. [Digital image processing.] Moscow: Mir, 1982, 312 p. (in Russian).

2. Gonzalez, R., Woods, R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. [Digital image processing.] Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1104 p. (in Russian).

3. Ahlberg, J., Nilson, E., Walsh, J. Teoriya splaynov i ee prilozheniya. [The theory of splines and their applications.] Moscow: Mir, 1972, 316 p. (in Russian).

4. Zavyalov, Y.S., Kvasov, B.I., Miroshnichenko, V.L. Metody splayn-funktsiy. [Spline-function methods.] Moscow: Nauka, 1980, 350 p. (in Russian).

5. Bezuglov, D.A., Krutov, V.A., Shvachko, O.V. Metod differentsirovaniya signalov s ispol'zovaniem splayn-approksimatsii. [The method of differentiation of signals using spline-approximation.] Fundamental Research, 2017, no.4, part 1, pp. 24 – 28 (in Russian).

6. Bezuglov, D.A., Krutov, V.A., Shvachko, O.V. Splayn-approksimatsiya v zadache differentsirovaniya signalov i izobrazheniy. [Spline approximation in the problem of differentiation of signals and images.] Modern High Technologies, 2017, no. 4, pp. 17–22 (in Russian).

7. Bezuglov, D.A., Kuzin, A.P., Voronin, V.V. Contour detection based on wavelet differentiation. Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications, 2016: Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2016, pp. 986–900.

8. Bezuglov, D.A., Bezuglov, Y.D., Shvidchenko, S.A. Method of discrete wavelet analysis of edges on the random background. 22nd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision: poster papers proceedings. Plzen, 2014, pp. 15–19.

9. Voronin, V.V., et al. Inpainting strategies for reconstruction of missing data in images and videos: Techniques, algorithms and quality assessment. Intelligent Information Technologies for Industry: Proceedings of the First International Scientific Conference. Sochi, 2016, vol. 2, pp. 163–174.

10. Bezuglov, D.A., Pomortsev, P.M., Sklyarov, A.V. Obrabotka rezul'tatov izmereniy na baze approksimatsii plotnosti raspredeleniya sglazhivayushchimi kubicheskimi B-splaynami. [Processing of measurement results based on approximation of distribution density by smoothing cubic B-splines.] Measurement Technique, 2000, no. 9, pp. 32 (in Russian).

11. Bezuglov, D.A., Sklyarov, A.V. Algoritm vosstanovleniya volnovogo fronta na baze dvumernykh sglazhivayushchikh kubicheskikh normalizovannykh B-splaynov. [Algorithm for reconstructing the wave front on the basis of two-dimensional smoothing cubic normalized B-splines.] Atmospheric and Oceanic Optics, 2000, vol. 13, no. 8, pp. 770 (in Russian).

12. Bezuglov, D.A., et al. Algoritmy otsenivaniya negaussovskikh protsessov na osnove matematicheskogo apparata sglazhivayushchikh B-splaynov. [Algorithms for estimating non-Gaussian processes on the basis of mathematical apparatus of smoothing B-splines.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Natural Sciences. 2005, no. S4, pp. 99–106 (in Russian).

13. Bezuglov, D.A., et al. Suboptimal'nyy algoritm otsenivaniya na osnove apparata sglazhivayushchikh B-splaynov. [A suboptimal estimation algorithm based on smoothing B-splines.] Measurement Technique, 2006, no. 10, pp. 14–17 (in Russian).

14. Bezuglov, D.A., Shvidchenko, S.A. Informatsionnaya tekhnologiya veyvlet-differentsirovaniya rezul'tatov izmereniy na fone shuma. [Information technology of wavelet differentiation measurements results on the background noise.] Herald of Computer and Information Technologies, 2011, no. 6 (84), pp. 42–45 (in Russian).

15. Bezuglov, D., et al. Vydelenie konturov izobrazheniy v informatsionnykh i upravlyayushchikh sistemakh s ispol'zovaniem metoda veyvlet-preobrazovaniya. [Isolation of the contour image in information system and control system by using method of wavelet transform.] NonlinearWorld, 2012, no. 11, pp. 846–852 (in Russian).

16. Bezuglov, D.A., Rytikov, S.Y., Shvidchenko, S.A. Metod veyvlet-differentsirovaniya v zadache vydeleniya konturov. [Method of wavelet differentiation in the problem of allocation of contours.] Telecommunications and Radio Engineering, 2012, no. 6, pp. 52–57 (in Russian).

17. Bezuglov, D.A., et al. Informatsionnaya tekhnologiya identifikatsii izobrazheniy. [Information technology of identification picture.] Fundamental Research, 2015, no. 2, part 16, pp. 3466–3470 (in Russian).

18. Bezuglov, D.A., Kuzin, A.P. Informatsionnaya tekhnologiya vydeleniya konturov izobrazheniy na fone shuma. [Information technology of image edge detection in the noise condition.] Modern Problems of Science and Education, 2015, no. 2, part 2, pp. 190 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.07.2017
Сдана в редакцию 11.07.2017
Запланирована в номер 05.10.2017

Received 10.07.2017
Submitted 11.07.2017
Scheduled in the issue 05.10.2017

Об авторах:

Крутов Владимир Алексеевич,
аспирант института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета (РФ, 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3284-4366
rostov_don@mail.ru

Безуглов Дмитрий Анатольевич,
заместитель директора по научной работе Ростовского филиала Российской таможенной академии (РФ, 344002, г. Ростов-на-Дону, пр. Буденновский, д. 20), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org /0000-0001-9991-4707
bezuglovda@mail.ru

Швачко Олег Викторович,
старший научный сотрудник научно-технического отдела Федерального казенного учреждения Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» Министерства внутренних дел Российской Федерации (РФ, 344113, г. Ростов-на-Дону, ул. Добровольского, д. 11/7), кандидат физико-математических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7496-3083
stis-rostov6@mail.ru

Authors:

Krutov, Vladimir A.,
postgraduate student of Institute of Service and Business (DSTU branch) (RF, 346500, Shakhty, ul. Shevchenko, 147),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3284-4366
rostov_don@mail.ru

Bezuglov, Dmitry A.,
associate director on research, Russian Customs Academy, Rostov Branch (RF, 344002, Rostov-on-Don, Budennovskiy pr., 20), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: http://orcid.org /0000-0001-9991-4707
bezuglovda@mail.ru

Shvachko, Oleg V.,
senior research scholar of the Research and Technology Department, Scientific and Production Association “Special Equipment and Telecoms”, Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation (RF, 344113, Rostov-on-Don, ul. Dobrovolskogo, 11/7), Cand.Sci. (Phys.-Math.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7496-3083
stis-rostov6@mail.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 512.6

10.23947/1992-5980-2017-17-4-107-115

Решение задачи подбора модели источника ошибок в ИС ОПСАПК*

В. М. Деундяк [1,2], М. А. Жданова [2], Н. С. Могилевская [3]**

[1] «НИИ «Спецвузавтоматика», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Solution to error source model selection problem in IS EASECC ***

V. M. Deundyak[1,2], M. A. Zhdanova[2], N. S. Mogilevskaya[3]**

[1] Research Institute “Spetsvuzavtomatika”, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Работа посвящена решению задачи подбора математической модели источника ошибок, адекватно отображающей заданный канал связи. Это многопараметрическая задача, решение которой аналитическими методами весьма затруднительно. Предлагается решать данную задачу в рамках информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого кодирования на основе последовательности ошибок, полученной из реального канала связи. Целью работы является развитие методов подбора средств помехоустойчивой защиты в системах передачи данных. Основная задача состоит в построении модификации информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого кодирования, позволяющей по потоку ошибок, полученному из реального канала связи, выбрать наиболее близкую математическую модель источника ошибок и на основе компьютерных имитационных экспериментов решить задачу согласования параметров помехоустойчивого кодека и характеристик конкретного канала связи. Отметим, что выбор помехоустойчивых методов предполагает выбор не только алгебраического кода, но и алгоритмов его кодирования и декодирования. Результаты использования помехоустойчивых методов зависят от интенсивности и структуры ошибок, действующих в канале передачи.

Материалы и методы. Основой описанной информационной системы является специализированный программный комплекс, основанный на имитационном моделировании помехоустойчивых каналов связи. Поставленная задача решается добавлением в информационную систему модуля подбора модели источника ошибок. В основе работы модуля подбора лежит разработанный алгоритм выбора адекватной математической модели источника ошибок, использующий методы теории скрытых полумарковских моделей, в частности, решение задачи оценивания.

Результаты исследования. Результатом работы является построенная модификация информационной системы оценки применимости схем помехоустойчивого кодирования, которая позволяет в автоматическом режиме из списка доступных методов помехоустойчивой защиты подбирать подходящий

Introduction. The development of error-correcting techniques in digital transmission channels is considered. This is a multiparameter problem the solution of which through the analytical methods is rather difficult. This problem is solved within the framework of an information system for evaluating the applicability of noise-immune coding schemes based on an error sequence obtained from a real communication channel. The work objective is to develop methods for selecting the means of noise-immune protection in the data transmission systems. The key problem is to modify an information system evaluating the applicability of error-correcting coding so that it can choose the most appropriate error-source model for the error flow registered in the particular channel, and coordinate error-correcting codec parameters and characteristics of the communication channel based on the simulation experiments. Note that the choice of error-correcting methods involves selecting not only an algebraic code, but also algorithms for its coding and decoding. The results of using the error-correcting methods depend on the intensity and structure of the errors acting in the transmission channel.

Materials and Methods. The basis of the described information system is a specialized software package based on the noise-immune communication channels simulation. To construct such a modification, we suggest adding a new module responsible for the error-source model selection. The module involves a special algorithm for the adequate error-source model selection constructed on the basis of the hidden semi-Markov models theory methods, particularly, on the evaluation problem solution.

Research Results. The result of the work is a built-in modification of the information system for assessing the applicability of noise-immune coding schemes which allows, in an automatic mode, selecting a suitable method for a particular data transmission system from a list of the available methods of the anti-jamming protection.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: vl.deundyak@gmail.com, mary.zhdanova@gmail.com, nadezhda.mogilevskaia@yandex.ru

*** The research is done within the frame of independent R&D.

метод для конкретной системы передачи данных.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть применены при проектировании цифровых систем связи. Построенная информационная система позволяет автоматизировать процесс подбора алгоритмических методов помехоустойчивого кодирования в системах передачи данных.

Discussion and Conclusions. The results obtained can be applied under designing digital transmission channels. The constructed information system allows for the automation of the process of selecting algorithmic methods of the noise-proof protection in the data transmission systems.

Ключевые слова: цифровые системы связи, помехоустойчивые кодеки, скрытые полумарковские модели, источники ошибок, имитационные эксперименты.

Keywords: digital transmission channels, error-correcting codecs, hidden semi-Markov models, error sources, simulation experiments.

Образец для цитирования: Деундяк, В. М. Решение задачи подбора модели источника ошибок в ИС ОПСАПК. В. М. Деундяк , М. А. Жданова, Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 107–115.

For citation: V.M. Deundyak, M.A. Zhdanova, N.S. Mogilevskaya. On the solution of the error source model selection problem in the IS EAECC. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 107–115.

Введение. Согласно закону РФ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» под информационной системой понимается совокупность информации, содержащейся в базах данных, а также информационных технологий и технических средств, обеспечивающих её обработку. Под информационной системой оценки применимости схем алгебраического помехоустойчивого кодирования (ИС ОПСАПК) в системах передачи данных будем понимать систему, позволяющую на основе имитационных экспериментов оценить корректирующие способности помехоустойчивых алгебраических кодеков по отношению к ошибкам различного типа и подобрать оптимальный по заданным параметрам кодек к конкретному каналу связи. В состав ИС ОПСАПК включаются: методика составления плана проведения экспериментов; методика подбора согласованной пары «кодек — канал», использующей результаты имитационных экспериментов; база данных, хранящая условия и результаты проведенных экспериментов, включая блок анализа ее записей; специализированный программный комплекс, моделирующий работу помехоустойчивых каналов связи и позволяющий проводить имитационные эксперименты. Актуальность построения ИС ОПСАПК связана с тем, что при проектировании систем связи возникает сложная многопараметрическая задача согласования параметров помехоустойчивого кодека и характеристик канала [1]. Использование помехоустойчивых кодеков для борьбы с ошибками в цифровых каналах связи позволяет уменьшить количество ошибок, искажающих передаваемые данные, но, с другой стороны, повышает их объем, а увеличение объема влечет за собой либо снижение скорости передачи, либо необходимость улучшения технических характеристик канала для сохранения прежней скорости передачи. В [1, 2] доказано, что при подборе согласованной пары «помехоустойчивый кодек и канал связи» (далее — кодек-канал) среди множества характеристик каналов связи для получения качественного результата достаточно учитывать интенсивность ошибок и их характер. Под характером ошибок понимается их взаимное расположение в потоке ошибок, например, ошибки могут быть независимыми или группироваться в пакеты, а пакеты в более сложные структуры [3]. Решение задачи составления эффективной пары кодек-канал аналитическими методами затруднительно [1]. Ядром ИС ОПСАПК является специализированный программный комплекс, основанный на имитационном моделировании помехоустойчивых каналов связи. Примером такого комплекса является «Канал» [4, 5]. Качество подбора пары кодек-канал с помощью ИС ОПСАПК зависит от используемых моделей источников ошибок, а также их адекватности реальным каналам связи.

Цель настоящей работы — модификация структуры ИС ОПСАПК посредством добавления модуля подбора модели источника ошибок (МИО) по зарегистрированной в канале связи последовательности ошибок. Основой для построения такого модуля является новый алгоритм, основанный на решении задачи оценивания для скрытых полумарковских моделей [6, 7]. В результате такой модификации ИС ОПСАПК позволит выбирать по потоку ошибок реального канала связи адекватную математическую модель потока ошибок из библиотеки МИО, реализованных в ИС ОПСАПК, и подбирать на основе компьютерных имитационных экспериментов помехоустойчивый кодек для конкретного исследуемого канала связи.

Структура ИМ ЦПК. Важной частью ИС ОПСАПК является специализированный программный комплекс, позволяющий проводить имитационные эксперименты. Рассмотрим структуру имитационной модели цифрового помехоустойчивого канала связи (ИМ ЦПК), используемую для построения специализированного программного обеспечения (рис. 1). ИМ ЦПК организована согласно классической структуре имитационной модели, принятой в общей теории имитационных моделей [8] и включает в себя следующие четыре блока: блок математической модели объекта (БММО), блок имитации внешних воздействий (БИВВ), блок обработки результатов (БОР) и блок управления имитационной модели (БУИМ).

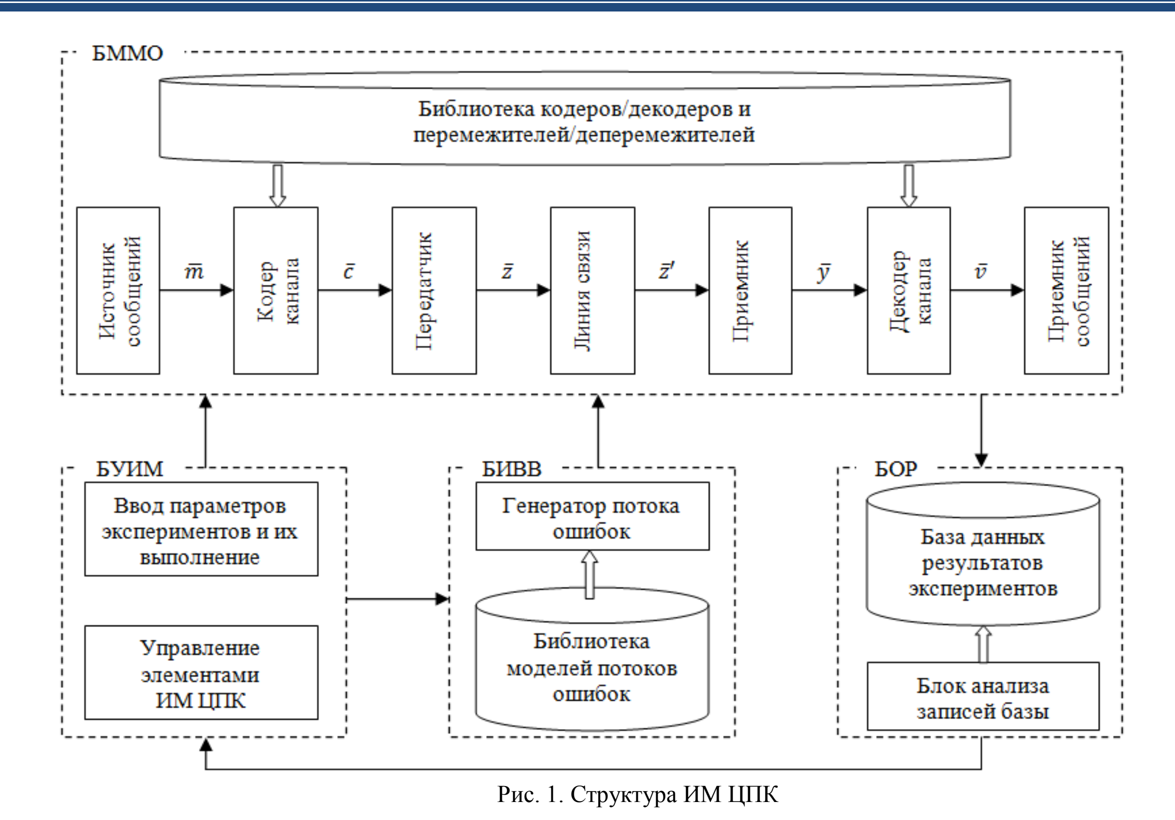


Рис. 1. Структура ИМ ЦПК

Fig. 1. Structure of simulation model of digital interference-free communication channel

Объектом имитационного моделирования является цифровой помехоустойчивый канал (ЦПК) передачи данных, поэтому БММО представляет собой блок математической модели ЦПК. Рассмотрим элементы БММО (рис. 1). Источник сообщений формирует информационные векторы $\bar{m} = (m_1, ..., m_k) \in F_q^k$, где F_q^k — линейное k-мерное пространство над полем Галуа F_q мощности q. С использованием помехоустойчивого $[n, k]_q$-кода C длины n и размерности $k(<n)$ заданного над F_q, эти векторы обрабатываются в кодере канала [2]. Кодовые векторы $\bar{c} \in F_q^n$ поступают в передатчик, который служит интерфейсом к линии связи и преобразует векторы $\bar{c} \in F_q^n$ в векторы $\bar{z} = (z_1, z_2, ..., z_n) \in \Omega^n$, где Ω — конечное множество, связанное с физической реализацией канала, при этом Ω может как совпадать, так и не совпадать с F_q. Так, например, в [9] передатчик получает векторы из F_3^n, а новые формирует над полем комплексных чисел; в [10] рассмотрен случай, когда входными для передатчика являются векторы над алфавитом $\{0;1\}$, а выходными — векторы над $\{-1; 1\}$. Сформированные векторы $\bar{z} = (z_1, z_2, ..., z_n)$ передатчик на физическом уровне отправляет в линию связи. В линии связи действуют помехи, искажающие передаваемые сигналы, из-за чего на выходе из линии связи формируются векторы $\bar{z}'$ из множества $\tilde{\Omega}^n$, получаемого как расширение Ω^n. Вектор $\bar{z}'$ поступает на вход приемника, который в зависимости от настроек может выдавать мягкие ($\bar{y} \in \tilde{\Omega}^n$) или жесткие ($\bar{y} \in F_q^n$) решения о принятом сигнале. Далее $\bar{y}$ поступает в декодер, задача которого состоит в обнаружении и исправлении ошибок в $\bar{y}$, и восстановлении соответствующего ему информационного вектора $\bar{v}$. В зависимости от уровня повреждения вектора $\bar{z}$ в канале связи результат декодирования может совпадать с исходным вектором или отличаться от него. Если $\bar{m} = \bar{v}$, то говорят о верном декодировании, иначе говорят об ошибке декодирования.

В схеме на рис. 1 с элементами «Кодер канала» и «Декодер канала» связана библиотека кодеров (декодеров) и перемежителей (деперемежителей) [1]. В общем случае кодер (декодер) канала может представлять собой комбинацию из нескольких последовательно соединенных кодеров (декодеров) и перемежителей (деперемежителей), т. е. каскад кодеков. На рис. 2 схематично изображены каскадированные кодеры и декодеры и использованы обозначения: C_i и D_i — кодеры и декодеры, π_j и π_j^{-1} — перемежители и деперемежители, соответственно. Очевидно, что элементы кодера и декодера канала должны быть согласованы между собой, т. е. в парах C_i и D_i, а также в парах π_j и π_j^{-1} должны реализовываться связанные алгоритмы. Техника каскадирования кодеков и перемежителей довольно распространена, например, национальный стандарт РФ для защиты от шумов физического канала в системе передачи космических данных предлагает, в частности, кодировать битовый поток каскадом из блочного [255, 223]-кода Рида-Соломона и сверточного [7, 12]-кода [11].

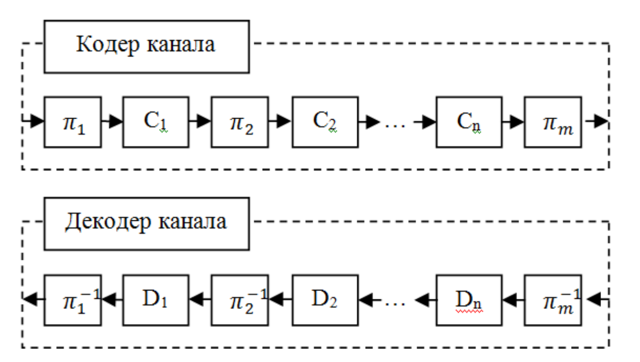


Рис. 2. Схема организации каскадов в кодере и декодере канала

Fig. 2. Diagram of cascade organization in channel coder and decoder

Рассмотрим БИВВ ИС ОПСАПК. Согласно [8], БИВВ формирует реализации случайных или детерминированных процессов, имитирующих воздействия внешней среды на объект. Задача этого блока (рис. 1) заключается в моделировании источника ошибок. Результатом работы БИВВ является поток ошибок, который воздействует на передаваемые по линии связи данные. БИВВ содержит базу МИО и генератор, порождающий потоки ошибок на основе модели, выбранной из базы блоком управления имитационной модели. В литературе описано большое количество математических МИО для моделирования различных реальных каналов связи [12–14]. В связи с этим представляется удобным использовать общую модель источника ошибок канала, которая позволила бы с помощью настройки ее параметров моделировать различные случаи помеховой обстановки.

Основное назначение БУИМ — автоматизация процесса проведения имитационных экспериментов [8]. Блок управления ИМ ЦПК (рис. 1) выполняет следующие задачи: ввод исследователем параметров проводимой серии экспериментов (план экспериментов); автоматическая проверка корректности введенных параметров; запуск выполнения серии экспериментов; при необходимости прерывание текущего эксперимента и переход к следующему в серии проводимых экспериментов; полная остановка проводимой серии экспериментов. Отметим, что в ходе выполнения плана имитационных экспериментов на установки параметров блока БУИМ могут повлиять результаты обработки данных в блоке БОР, а также может возникнуть задача коррекции заданных параметров. Исследователь при вводе параметров каждого эксперимента может указывать: характеристики последовательности, выдаваемой источником сообщений ИМ ЦПК; кодек или каскад кодеков и перемежителей; параметры источника ошибок; виды статистической обработки результатов эксперимента и необходимость их хранения.

Согласно [8] блок обработки результатов предназначен для получения информативных характеристик исследуемого объекта, а необходимая для этого информация поступает из БММО. Одной из задач, решаемых БОР в ИМ ЦПК, является вычисление ряда характеристик ошибок, внесенных каналом, и ошибок, оставшихся в сообщении после декодирования. Список оцениваемых параметров формируется с учетом рекомендаций *G*.821, *G*.826 и *M*.2100 Международного союза электросвязи (*International Telecommunication Union*) [15]. Например, для бинарного канала к таким параметрам относятся: число ошибочных битов и блоков, частота битовых и блоковых ошибок и др. В базе данных БОР сохраняются все сведения, полно описывающие проведенные эксперименты. К таким сведениям, например, относятся: размер исходного файла (потока информационного сообщения); способ кодирования (использованные кодеки и их параметры, использованные перемежители и их характеристики); характеристика помехи; результаты статистической обработки экспериментов; время проведения эксперимента и другие полезные сведения. БД связана с блоком обработки результатов. Сохраняемые в базе данных параметры позволяют в дальнейшем анализировать различные аспекты использования помехоустойчивых кодеков. Блок анализа записей базы данных осуществляет составление выборок записей базы по заданным условиям и построение различных графиков и таблиц.

Подбор модели источника ошибок для реального канала связи. При построении базы МИО для ИС ОПСАПК удобно в качестве базовых использовать модели с одинаковой структурой, достаточно общие, чтобы моделировать различные типы помеховой обстановки в канале. В [1, 4, 5] в качестве базовой модели предлагалось использовать *QP*-модели и *QPn*-модели [12, 16].

Другим важным фактором при выборе базовой модели является возможность решения для нее обратной задачи, т. е. задачи подбора по регистрируемой в канале последовательности ошибок модели, способной генерировать наиболее близкие к канальной последовательности потоки ошибок. Из этих соображений представляется удобным составлять базу моделей источников ошибок из скрытых полумарковских моделей. Напомним [6, 17], что общей скрытой полумарковской моделью называется набор

$$\lambda = \{S, D, A, \Pi, V, B\},$$

где $S = \{1,..,N\}$ — алфавит состояний дискретной полумарковской цепи; $D = \{1,..,D_{\max}\}$ — алфавит возможных длительностей состояний.

Об элементах декартова произведения $S \times D$ далее будем говорить как об обобщенных состояниях. В вышеприведенной формуле $A = \{a_{(i,d)(i',d')}\}_{(i,d),(i',d') \in S \times D}$ — матрица переходных вероятностей для обобщенных состояний, то есть $a_{(i,d)(i',d')}$ — это вероятность перехода из обобщенного состояния (i,d) в обобщенное состояние (i',d'); $\Pi = \{\pi_{(i,d)}\}_{(i,d) \in S \times D}$ — набор исходных распределений вероятностей обобщенных состояний, т. е. $\pi_{(i,d)}$ — вероятность того, что система прибывала в обобщенном состоянии (i,d) до начала наблюдений; $V = \{v_1,..,v_M\}$ — алфавит наблюдаемых символов; $B = \{b_{i,d}(\hat{o}_1,..,\hat{o}_d)\}_{(i,d) \in S \times D, (\hat{o}_1,..,\hat{o}_d) \in V^d}$ — набор распределений вероятностей наблюдений последовательностей $(\hat{o}_1,..,\hat{o}_d) \in V^d$ в обобщенных состояниях.

Частные случаи общей скрытой полумарковской модели, такие как скрытая полумарковская *QP*-модель и скрытая полумарковская модель фергюсоновского типа, можно использовать для моделирования источника ошибок [6, 7]. При различных параметрах эти модели обобщают известные модели источников ошибок, что позволяет с их помощью генерировать потоки ошибок различной структуры. Важным преимуществом моделирования потоков ошибок на основе скрытых полумарковских моделей является возможность решения для них задачи подбора. В основе предлагаемого авторами метода подбора адекватной канальному потоку ошибок скрытой полумарковской модели лежит решение так называемой задачи оценивания (*evaluation problem*) [17, 18]. Под задачей оценивания понимается задача вычисления вероятности $P[O_{1:T} \mid \lambda]$ генерации известной последовательности $O_{1:T} = O_1,..,O_T$ с помощью модели λ. Эта задача была решена авторами для случаев общей скрытой полумарковской модели, скрытой полумарковской модели Фергюсона [6], а также скрытой полумарковской *QP*-модели [7]. Решение задачи оценивания основывается на подходе Ю [17], улучшающем метод [18].

Приведем решение задачи оценивания для случая общей скрытой полумарковской модели [6]. Пусть λ — общая скрытая полумарковская модель. В предположении, что первое наблюдаемое состояние началось при $t \le 1$, а последнее наблюдаемое состояние закончилось при $t \ge T$, вероятность $P[O_{1:T} \mid \lambda]$ может быть вычислена по следующей формуле:

$$P[O_{1:T} \mid \lambda] = \sum_{j \in S} \sum_{d \in D} \sum_{d_1=1}^{d} P[O_{1:T-d_1} \mid \lambda] \bar{\alpha}_{T-d_1+d}(j,d) b_{j,d}(O_{T-d_1+1}^{T-d_1+d}),$$

где

$$P[O_{1:t} \mid \lambda] = \begin{cases} 1, & t \le 0, \\ \sum_{j \in S} \sum_{d \in D} \sum_{d_1=1}^{d} P[O_{1:t-d_1} \mid \lambda] \bar{\alpha}_{t-d_1+d}(j,d) b_{j,d}(O_{t-d_1+1}^{t-d_1+d}), & t \in [1,T], \end{cases}$$

$$\bar{\alpha}_t(i,d) = \begin{cases} \pi_{i,d}, & t \le 0, \\ \sum_{i' \in S} \sum_{d' \in D} \bar{\alpha}_{t-d}(i',d') \bar{b}_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) a_{(i',d')(i,d)}, & t > 0, \end{cases}$$

$$\bar{b}_{i',d'}(O_{T-d-d'+1}^{t-d}) = \frac{b_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) P[O_{1:t-d-d'} \mid \lambda]}{P[O_{1:t-d} \mid \lambda]}.$$

Численные эксперименты показывают, что при достаточно больших T значение $P[O_{1:T} \mid \lambda]$ насколько мало, что может оказаться за пределом вычислительной точности. Для решения этой проблемы предлагается разбивать последовательность $O_{1:T}$ на сегменты равной длины, для каждого из сегментов вычислять вероятность его генерации моделью λ и полученные значения усреднять. Результат усреднения обозначим $P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda]$. Далее при решении задачи подбора адекватной скрытой полумарковской модели источника ошибок по реальной канальной последовательности вместо $P[O_{1:T} \mid \lambda]$ будем использовать $P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda]$.

Рассмотрим алгоритм решения задачи подбора адекватной скрытой полумарковской модели. Предположим, что имеется набор скрытых полумарковских моделей источников ошибок $\Lambda = \{\lambda_1,..,\lambda_n\}$ и в канале передачи данных зарегистрирована последовательность ошибок $O_{1:T}$. Найдем такую модель $\lambda(O_{1:T})$ из Λ, которая позволит генерировать наиболее близкие к $O_{1:T}$ последовательности ошибок.

Алгоритм.

Вход: набор скрытых полумарковских моделей источников ошибок $\Lambda = \{\lambda_1,..,\lambda_n\}$; последовательность ошибок $O_{1:T}$.

Выход: модель $\lambda(O_{1:T})$.

Описание работы:

Шаг 1. Для каждой модели $\lambda(\in \Lambda)$ вычисляем вероятность $P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_i]$.

Шаг 2. Выбираем модель

$$\lambda(O_{1:T}) = \arg\max_{\lambda_i \in \Lambda}(P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_i]).$$

Критерий, используемый на шаге 2, называется критерием максимального правдоподобия. Заметим, что для выбора наилучшей модели можно использовать также другие критерии [18], например, критерий максимума относительной вероятности между последовательностью $O_{1:T}$ и полным набором моделей Λ:

$$\lambda(O_{1:T}) = \arg\max_{\lambda_i \in \Lambda}\left(\frac{P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_i]}{\sum_{\lambda_j \in \Lambda} P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_j]}\right)$$

или критерий максимума средней взаимной информации между последовательностью $O_{1:T}$ и полным набором моделей Λ:

$$\lambda(O_{1:T}) = \arg\max_{\lambda_i \in \Lambda} \log\left(\frac{P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_i]}{\sum_{\lambda_j \in \Lambda} P_{avg}[O_{1:T} \mid \lambda_j]}\right).$$

Выбор критерия диктуется практическими соображениями.

Модификация ИС ОПСАПК на основе подбора модели источника ошибок. Рассмотрим ИС ОПСАПК, полагая, что библиотека моделей источников ошибок (БМИО) содержит только модели из класса скрытых полумарковских моделей. Расширим функции этой информационной системы возможностью анализировать приходящую канальную последовательность ошибок и находить для нее такую модель источника ошибок из БМИО, которая генерирует последовательности ошибок, близкие к полученной последовательности.

Для решения этой задачи расширим БУИМ из ИС ОПСАПК модулем подбора математической модели источника ошибок (МПМИО). Основой построения такого модуля является разработанный в предыдущем разделе алгоритм. Задача МПМИО состоит в выборе из набора МИО модели, наилучшим образом соответствующей реальной канальной последовательности. Расширенный блок обозначим БУИМ(А). На рис. 3 представлена схема потоков данных между элементами модифицированной информационной системы. Рассмотрим подробнее работу этой системы с точки зрения решения поставленной задачи подбора модели.

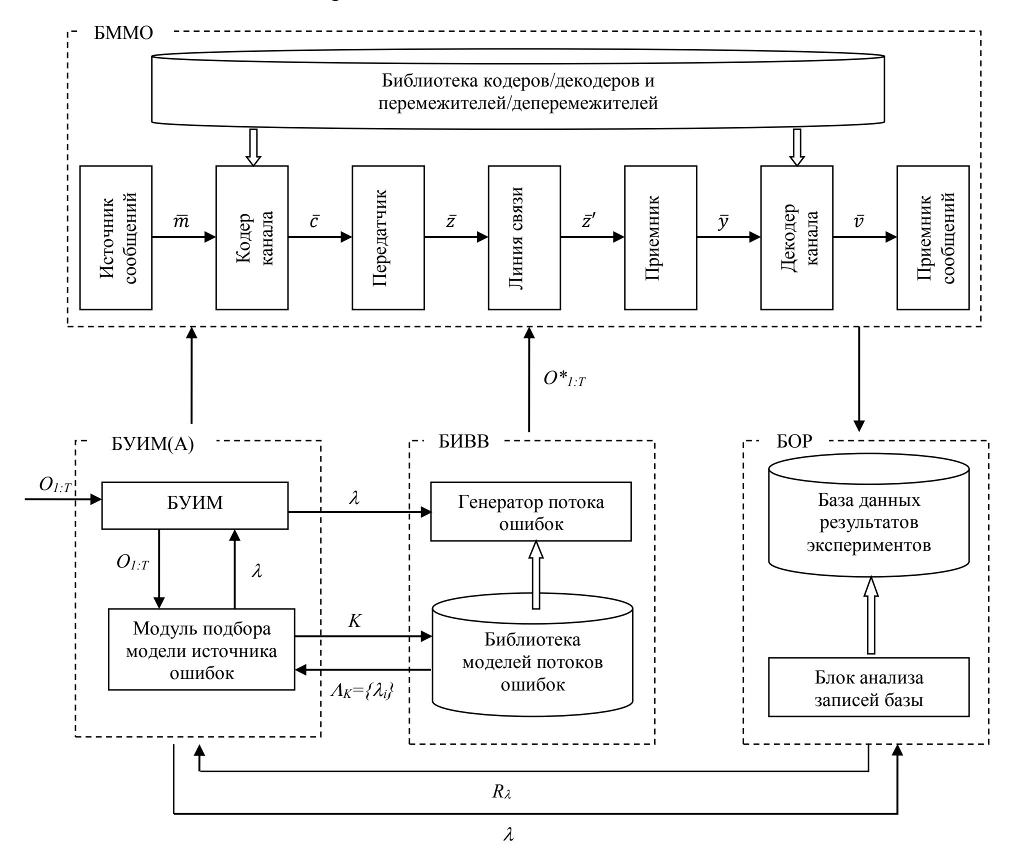


Рис. 3. Схема потоков данных в модифицированной ИС ОПСАПК

Fig. 3. Diagram of data streams in modified IS EASECC

На вход блока управления имитационной моделью (БУИМ) подается последовательность наблюдений $O_{1:T}$. БУИМ передает эту последовательность МПМИО, который, используя предварительную информацию о $O_{1:T}$, определяет критерий K выбора подмножества моделей источника ошибок $\Lambda_K = \{\lambda_i\}$ из БМИО, способных сгенерировать такую последовательность. Получив набор моделей источников ошибок $\Lambda_K = \{\lambda_i\}$, МПМИО с помощью метода подбора из предыдущего раздела выбирает из него наиболее адекватную модель λ.

Выбранная модель λ возвращается в БУИМ, который запрашивает у БОР результаты R_λ интересующих пользователя экспериментов, проведенных с участием этой модели. Если искомые результаты R_λ найдены, то необходимость в проведении имитационных экспериментов отпадает. Полученные результаты R_λ возвращаются пользователю. Если же эксперименты для выбранной модели еще не проводились, то модель λ подается блоком управления на вход генератора потоков ошибок, который производит генерацию потока ошибок моделью λ, и БУИМ запускает имитационные эксперименты. Результаты проведенных экспериментов подаются на вход БОР и сохраняются в базе данных результатов экспериментов, после чего выдаются пользователю.

Обсуждение и заключения. Решена задача адекватного представления потока ошибок в реальном канале связи математической МИО из заранее заданного набора скрытых полумарковских моделей. На основе этого построена модификация ИС ОПСАПК, в рамках которой предложено использование скрытых полумарковских моделей в качестве базовых моделей источника ошибок. В информационную систему добавлен модуль подбора модели источника ошибок, адекватной конкретному каналу связи. Модифицированная информационная система позволяет по потоку ошибок, полученному из реального канала связи, выбрать наиболее близкую математическую МИО и на основе компьютерных имитационных экспериментов решить задачу согласования параметров помехоустойчивого кодека и характеристик конкретного канала связи.

Библиографический список

1. Деундяк, В. М. Методы оценки применимости помехоустойчивого кодирования в каналах связи / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : изд. центр Донского гос. техн. ун-та, 2007. — 86 с.

2. Деундяк, В. М. Методы помехоустойчивой защиты данных / В. М. Деундяк, А. Э. Маевский, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : изд-во ЮФУ, 2014. — 309 с.

3. Теория передачи информации. Терминология / под. ред. В. И. Сифорова. — Москва : Наука, 1984. — 45 с.

4. Могилевская, Н. С. Особенности реализации механизма подключения библиотек сторонних разработчиков в информационной системе «Канал» / Н. С. Могилевская, К. А. Чугунный // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 3 (82). — С. 47–53.

5. Могилевская, Н. С. Информационная система исследования эффективности алгебраических схем помехоустойчивой защиты в системах передачи данных [Электронный ресурс] / Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — Режим доступа : http://www.science-education. ru/ru/article/view?id=17127 (дата обращения: 03.01.16).

6. Деундяк, В. М. О решении задачи оценивания скрытых полумарковских моделей фергюсоновского типа / В. М. Деундяк, М. А. Жданова // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Естественные науки. — 2015. — № 3. — С. 19–24.

7. Деундяк, В. М. О решении задачи оценивания скрытых полу-марковских *QP*-моделей / В. М. Деундяк, М. А. Жданова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 4 (79). — С. 5–16.

8. Law, A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M Law, L. Kelton – Tata Mcgraw-Hill Publishing Company Limited, 2003. – 760 pp.

9. Деундяк, В. М. Модель троичного канала передачи данных с использованием декодера мягких решений кодов Рида-Маллера второго порядка / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. — 2015. — № 1 (182). — С. 3–10.

10. Сидельников, В. М. Декодирование кодов Рида-Маллера при большом числе ошибок / В. М. Сидельников, А. С. Першаков // Проблемы передачи информации. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 80–94.

11. Система передачи космических данных и информации. Пакетная телеметрия : ГОСТ Р 56096-2014. — Москва : Стандартинформ, 2015. — 18 с.

12. Деундяк, В. М. Математическое моделирование источников ошибок цифровых каналов передачи данных / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : изд. центр Донского гос. техн. ун-та, 2006. — 69 с.

13. Иванов, Ю. Д. Составная модель источника ошибок в дискретных каналах преобразования данных / Ю. Д. Иванов, Б. В. Лозка, Е. О. Козлюк // Системный анализ и прикладная информатика. — 2016. — № 3. — С. 26–33.

14. Шелухин, О. И. Алгоритм оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи беспроводного доступа с подвижными объектами / О. И. Шелухин, А. В. Арсеньев, В. Ю. Фоминский // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. — 2009. — № 1. — С. 70–77.

15. The official site of International Telecommunication Union. Available at: https://www.itu.int/rec/T-REC/en (accessed: 14.05.2017).

16. Деундяк, В. М. Математическое моделирование источника ошибок q-ичного канала передачи данных / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Технические науки. — 2008. — № 1. — С. 3–7.

17. Shun-Zheng, Y. Hidden semi-Markov models / Yu Shun-Zheng // Artificial Intelligence. 2010. V. 174. n.2. P. 215–243.

18. Rabiner, L.R. A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition / Rabiner L.R. // Proceedings of the IEEE 77(2). 1989. P.257–586.

References

1. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Metody otsenki primenimosti pomekhoustoychivogo kodirovaniya v kanalakh svyazi. [Methods for assessing applicability of noise-immune coding in communication channels.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2007, 86 p. (in Russian).

2. Deundyak, V.M., Maevskiy, A.E., Mogilevskaya, N.S. Metody pomekhoustoychivoy zashchity dannykh. [Methods of anti-jamming data protection.] Rostov-on-Don: SFU Publ. Centre, 2014, 309 p. (in Russian).

3. Siforov, V.I., ed. Teoriya peredachi informatsii. Terminologiya. [Communication theory. Terminology.] Moscow: Nauka, 1984, 45 p. (in Russian).

4. Mogilevskaya, N.S., Chugunniy, K.A. Osobennosti realizatsii mekhanizma podklyucheniya bibliotek storonnikh razrabotchikov v informatsionnoy sisteme «Kanal». [Implementation features of the third-party DLL connection mechanism in the information system “Channel”.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 3 (82), pp. 47–53 (in Russian).

5. Mogilevskaya, N.S. Informatsionnaya sistema issledovaniya effektivnosti algebraicheskikh skhem pomekhoustoychivoy zashchity v sistemakh peredachi dannykh. [Information system research efficiency algebraic error correction scheme in data transmission systems.] Modern Problems of Science and Education, 2015, no. 1, part 1. Available at: http://www.science-education. ru/ru/article/view?id=17127 (accessed: 03.01.16) (in Russian).

6. Deundyak, V.M., Zhdanova, M.A. O reshenii zadachi otsenivaniya skrytykh polumarkovskikh modeley fergyusonovskogo tipa. [On the solution of evaluation problem for hidden semi-Markov models of Ferguson’s type.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Natural Sciences. 2015, no. 3, pp. 19–24 (in Russian).

7. Deundyak, V.M., Zhdanova, M.A. O reshenii zadachi otsenivaniya skrytykh polu-markovskikh QP-modeley. [Solution to evaluation problem of hidden semi-Markov QP-models.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 4 (79), pp. 5–16 (in Russian).

8. Law, A.M., Kelton, L. Simulation Modeling and Analysis. Tata Mcgraw-Hill Publishing Company Limited, 2003, 760 pp.

9. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Model' troichnogo kanala peredachi dannykh s ispol'zovaniem dekodera myagkikh resheniy kodov Rida-Mallera vtorogo poryadka. [The model of the ternary communication channel with using the decoder of soft decision for Reed-Muller codes of the second order.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2015, no. 1 (182), pp. 3–10 (in Russian).

10. Sidelnikov, V.M., Gershakov, A.S. Dekodirovanie kodov Rida-Mallera pri bol'shom chisle oshibok. [Decoding of Reed-Muller codes with a large number of errors.] Problems of Information Transmission, 1992, vol. 28, no. 3, pp. 80–94 (in Russian).

11. Sistema peredachi kosmicheskikh dannykh i informatsii. Paketnaya telemetriya: GOST R 56096-2014. [State standard P 56096-2014. System of transfer of the space data and the information. Package telemetry.] Moscow: Standartinform, 2015, 18 p. (in Russian).

12. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Matematicheskoe modelirovanie istochnikov oshibok tsifrovykh kanalov peredachi dannykh. [Mathematical modeling of error sources of digital data transmission channels.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2006, 69 p. (in Russian).

13. Ivanov, Y.D., Lozka, B.V., Kozlyuk, E.O. Sostavnaya model' istochnika oshibok v diskretnykh kanalakh preobrazovaniya dannykh. [Composite model error sources in discrete channels of data conversion.] System Analysis and Applied Information Science, 2016, no. 3, pp. 26–33 (in Russian).

14. Shelukhin, O.I., Arsenyev, A.V., Fominskiy, V.Y. Algoritm otsenki veroyatnosti paketirovaniya oshibok v kanalakh svyazi besprovodnogo dostupa s podvizhnymi ob"ektami. [Algorithm for the assessment of the packaging errors probability in wireless communication systems with active objects.] Universities for Tourism and Service Association Bulletin, 2009, no. 1, pp. 70–77 (in Russian).

15. The official site of International Telecommunication Union. Available at: https://www.itu.int/rec/T-REC/en (accessed: 14.05.2017).

16. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Matematicheskoe modelirovanie istochnika oshibok q-ichnogo kanala peredachi dannykh. [Mathematical modeling of the source of errors of q-ary data channel.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series. 2008, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).

17. Shun-Zheng, Y. Hidden semi-Markov models. Artificial Intelligence, 2010, vol. 174, no. 2, pp. 215-243.

18. Rabiner, L.R. A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE 77(2), 1989, pp. 257-586.

Поступила в редакцию 16.06.2017
Сдана в редакцию 16.06.2017
Запланирована в номер 26.09.2017

Received 16.06.2017
Submitted 16.06.2017
Scheduled in the issue 29.09.2017

Об авторах:

Деундяк Владимир Михайлович,
доцент кафедры «Алгебра и дискретная математика» Института математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул.Мильчакова, 8А), кандидат физ.-мат. наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8258-2419
vl.deundyak@gmail.com

Жданова Мария Андреевна,
аспирант кафедры «Алгебра и дискретная математика» Института математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул.Мильчакова, 8А),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9117-8693
mary.zhdanova@gmail.com

Могилевская Надежда Сергеевна,
доцент кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1357-5869
nadezhda.mogilevskaia@yandex.ru

Authors:

Deundyak, Vladimir M.,
associate professor of the Algebra and Discrete Mathematics Department, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, Milchakova St., 8A), Cand.Sci. (Phys.-Math.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8258-2419
vl.deundyak@gmail.com

Zhdanova, Maria A.,
postgraduate student of the Algebra and Discrete Mathematics Department, Vorovich Institute for Mathematics, Mechanics, and Computer Science, Southern Federal University (RF, 344090, Rostov-on-Don, Milchakova St., 8A),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9117-8693
mary.zhdanova@gmail.com

Mogilevskaya, Nadezhda S.,
associate professor of the Cybersecurity of IT Systems Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1357-5869
nadezhda.mogilevskaia@yandex.ru

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.89 10.23947/1992-5980-2017-17-4-116-121

Имитационное моделирование зависимости информационной безопасности организации от области деятельности*

О. Л. Цветкова[1], С. А. Заслонов[2]**

[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Simulation modeling of organization's infosecurity dependence on field of activity ***

O. L. Tsvetkova[1], S. A. Zaslonov[2]**

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Сформулировано решение задачи повышения эффективности системы защиты информации на предприятии путем своевременного выявления существенных факторов, влияющих на уровень информационной безопасности. Целью работы является разработка имитационной модели, отражающей влияние различных факторов, обусловленных показателями перспективности выбранной области деятельности организации, на эффективность функционирования системы защиты информации.

Материалы и методы. Имитационная модель реализована с использованием техники системной динамики в виде потоковой диаграммы. В качестве исходных данных предложено использовать обобщенные экспертные оценки перспективности направления деятельности. В модели применяются три системных уровня, которые определяют переменные состояния системы: степень эффективности системы защиты информации, бюджет организации на средства защиты информации и оценка качеств потенциальных нарушителей информационной безопасности. Также вводятся дополнительные параметры и переменные разрабатываемой модели: ценность информации, обрабатываемой в организации; оценка количества инцидентов информационной безопасности; текущие затраты на систему защиты информации; постоянный бюджет на систему защиты информации.

Результаты исследования. В качестве среды имитационного моделирования был выбран пакет *Vensim*. Анализ результатов моделирования показал, что характеристики области деятельности и качество информации, циркулирующей в информационной системе предприятия, напрямую определяют интерес со стороны потенциальных нарушителей, что приводит к необходимости четкого планирования и корректировки затрат на систему защиты информации. Таким образом, продемонстрирована возможность практического использования разработанной модели для оценки уровня информационной безопасности предприятий, осуществляющих свою деятельность в любой области. Отмечена необходимость привлечения экспертов с целью формирования оценок показателей перспективности возможных областей деятельности конкретной организации,

Introduction. The solution to the problem of efficiency improvement of the infosecurity system at the enterprise through early recognition of the essential factors affecting the level of information safety is defined. The work objective is to develop a simulation model that represents the effect of various factors caused by indicators of prospects of the selected area of the organization activity on the data protection system performance effect.

Materials and Methods. The simulation model is implemented using the system dynamics equipment in the form of the streaming graph. It is proposed to use generalized expert assessments of the activity prospects as source data. The model applies three system levels that determine system state variables: level of efficiency of the data protection system, organization's budget on information security tools, and the quality assessment of the potential infringers of cybersecurity. Besides, additional parameters and variables of the developed model are introduced: value of the information processed in the organization; estimated number of security incidents; current costs for the information security system; and continuous budget on the cybersecurity system.

Research Results. Vensim package is selected as a simulation environment. The modeling outcome analysis has shown that characteristics of the activity field and quality of the information circulating in the information system of the organization directly determine the interest of potential intruders that leads to the need for careful budgeting and adjustment of costs for the information security system. Thus, the implementability of the developed model for the assessment of the information safety level of the enterprises which operate in any area is shown. However, the involvement of experts in order to form assessments of indicators of prospects for eligible activity sectors of a particular organization and to conduct

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: olga_cvetkova@mail.ru, yamdfst@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

проведения аудита ее системы защиты.

Обсуждение и заключения. Реализация имитаций разработанной модели с различными начальными условиями и входными данными позволила определить динамику изменения информационной безопасности, обеспечить своевременное и эффективное развитие системы защиты, поддержку принятия решений специалистами службы безопасности при планировании расходов на защиту информации и изменений политики безопасности организации.

an audit on its protection system is required.

Discussion and Conclusions. Implementation of the developed model simulations under various entry conditions and entrance data allows for the definition of the dynamic patterns of IT security, and support for decision-making by security specialists when planning expenses on information security and changes in organization security policy.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системная динамика, потоковая диаграмма, причинно-следственная диаграмма, информационная безопасность, система защиты информации, оценка эффективности системы защиты информации, аудит системы защиты информации, потенциальный нарушитель информационной безопасности, конфиденциальная информация.

Keywords: simulation modeling, system dynamics, streaming graph, cause-effect diagram, cybersecurity, information security system, effectiveness evaluation of information security system, audit of data protection system, potential infringer of information security, private data.

Образец для цитирования: Цветкова, О. Л. Имитационное моделирование зависимости информационной безопасности организации от области деятельности / О. Л. Цветкова, С. А. Заслонов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 116–121.

For citation: O.L. Tsvetkova, S.A. Zaslonov. Simulation modeling of organization's infosecurity dependence on field of activity. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 116–121.

Введение. Задача защиты конфиденциальной информации является очень важной, от эффективности и своевременности ее решения во многом зависит процесс функционирования предприятия, наличие прибыли, конкурентоспособность, репутация. Для предприятий особенно важным является защита коммерческой информации от кражи и несанкционированного доступа. Заметим, что утечка информации может произойти непреднамеренно, вследствие небрежности сотрудников, или преднамеренно, например, по заказу конкурентов.

Появление новых угроз информационной безопасности (ИБ) и средств защиты приводят к необходимости модификации и развития системы защиты. Однако, как отмечено в [1], внедрение инновационных методов в сферу ИБ может сопровождаться определенными проблемами. Для оценки эффективности принимаемых решений и достигнутого уровня ИБ используются различные подходы [2, 3]. Одним из актуальных направлений подобных исследований, которое имеет как теоретическую, так и практическую ценность, является анализ процессов взаимодействия систем защиты информации с окружающей средой, выявление факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность защиты.

В настоящей работе выполняется построение имитационной модели, описывающей динамику влияния показателей перспективности выбранной области деятельности организации на систему защиты информации, целями создания которой является изучение процессов, протекающих в системе, а также обеспечение поддержки принятия решений при управлении системой защиты информации.

Использование техники имитационного моделирования для решения поставленных задач обусловлено тем, что исследуемые процессы воздействия различных факторов на систему защиты информации характеризуются наличием причинно-следственных связей, стохастических переменных, влиянием последствий. Подобные задачи исследования систем защиты информации с помощью имитационного моделирования рассматривались в ряде научных работ [4, 5]. Имитационное моделирование является популярным видом моделирования, используется в научных и прикладных областях для построения моделей разнообразных систем [6–9].

Разработка имитационной модели. Существует три основных подхода к имитационному моделированию: агентное, дискретно-событийное моделирование и системная динамика [10]. Эти подходы отличаются уровнем абстракции, точкой зрения на специфические процессы, протекающие в системе, на взаимосвязи между элементами, на правила и законы, определяющие динамику развития исследуемой системы.

Для решения поставленных задач предлагается использовать системную динамику, поскольку этот вид имитационного моделирования способствует наилучшему пониманию специфических особенностей процессов,

протекающих в системе, позволяет выявить причинно-следственные связи между объектами [11]. Методология системной динамики, предложенная Дж. Форрестером, основана на использовании потоковых диаграмм, обеспечивающих представление системы в виде структуры с обратными связями, и отображающих влияние одних параметров на другие [12].

Основными составляющими потоковых диаграмм являются: накопители (системные уровни); потоки (системные темпы); правила (обратные связи). Системные уровни представляют состояние системы. Системные темпы реализуют динамику системы, изменяют значения системных уровней и характеризуют скорость этого изменения, причем проводится разделение на входящие и выходящие потоки. Обратные связи определяют взаимное влияние элементов системы.

Для системных уровней составляется система дифференциальных уравнений по Дж. Форрестеру [12]:

$$\frac{d\overline{x}}{dt} = f(\overline{x}, \overline{a}) = \overline{x}^{+} - \overline{x}^{-},$$

где $f(\overline{x}, \overline{a})$ — вектор-функция, зависящая от переменных $\overline{x}$ и параметров $\overline{a}$ модели; $\overline{x}^{+}, \overline{x}^{-}$ — положительный и отрицательный темпы изменения системных уровней $\overline{x}$, содержащие факторы роста и убывания $\overline{x}$.

Исходными данными для имитационной модели являются экспертные оценки показателей перспективности области деятельности организации, выбор которой влияет на качества циркулирующей в организации информации, на прибыль и на заинтересованность со стороны потенциальных нарушителей.

В качестве системных уровней (накопителей), которые определяют переменные состояния системы, в модели предлагается использовать:

- степень эффективности системы защиты информации (Q);
- бюджет организации на средства защиты информации (СЗИ) — количество денежных средств, выделяемых на модификацию и содержание системы защиты информации (K);
- оценку качеств потенциальных нарушителей ИБ — обобщенный показатель, характеризующий количество потенциальных нарушителей, их заинтересованность, материальную и техническую оснащенность, профессиональные навыки (N).

Таким образом, на уровень ИБ будет влиять три величины, для которых в соответствии с [12] составляются дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} dQ/dt = Q^{+} - Q, \\ dK/dt = K^{+} - K, \\ dN/dt = N^{+} - N, \end{cases}$$

где Q^{+}, Q — темпы увеличения и снижения эффективности системы защиты информации соответственно; K^{+}, K — скорости увеличения и уменьшения капитала организации соответственно; N^{+}, N — темпы увеличения и снижения умений, возможностей и заинтересованности потенциальных нарушителей ИБ.

Дополнительные параметры и переменные разрабатываемой имитационной модели:

- обобщенная оценка показателей перспективности области деятельности организации. Используется в качестве входной переменной, получаемой на основе экспертных оценок, учитывающих актуальность, прибыльность области деятельности, а также оценку уровня заинтересованности потенциальных нарушителей (конкурентов, нелояльных сотрудников, хакеров) в информации, циркулирующей в организации;
- ценность информации, обрабатываемой в организации, прямо пропорциональная обобщенной оценке показателей перспективности области деятельности организации;
- оценка количества инцидентов ИБ — показатель, зависящий от активности потенциальных нарушителей;
- текущие затраты на СЗИ, зависящие от оценки количества возникающих инцидентов ИБ;
- постоянный бюджет на СЗИ — константа, определяемая на основе аналитических прогнозов изменения условий функционирования организации и требований к защите информации.

Разработанная потоковая диаграмма представлена на рис. 1.

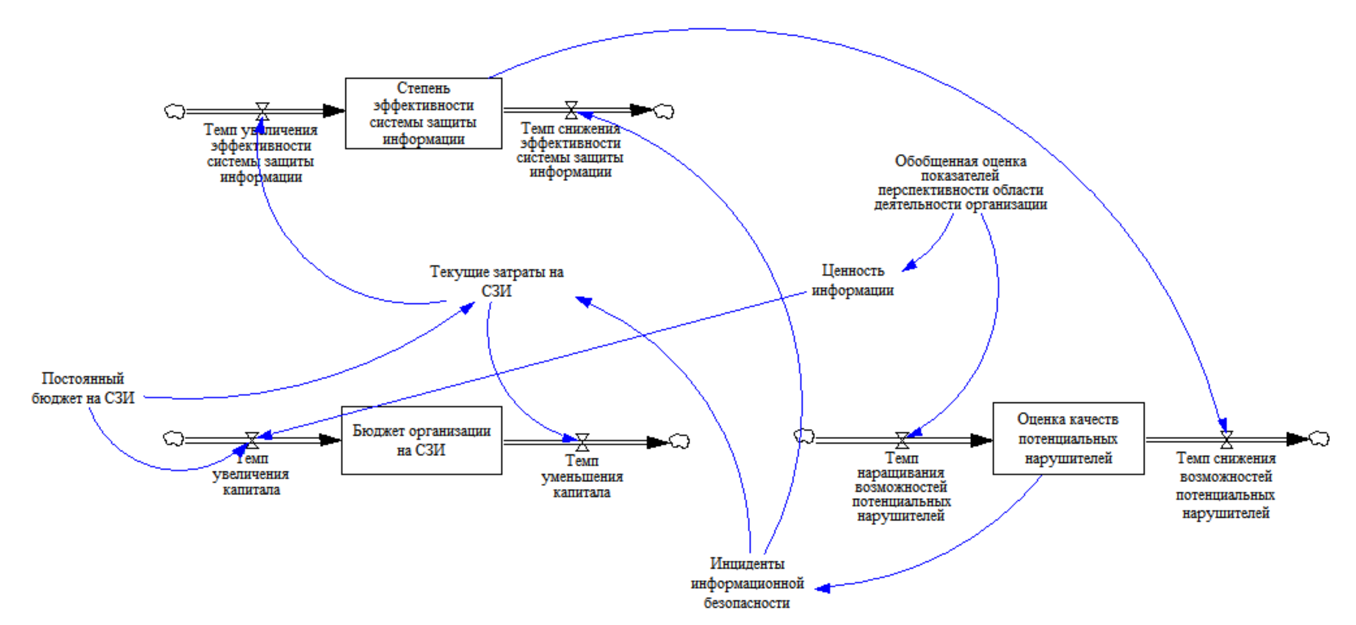
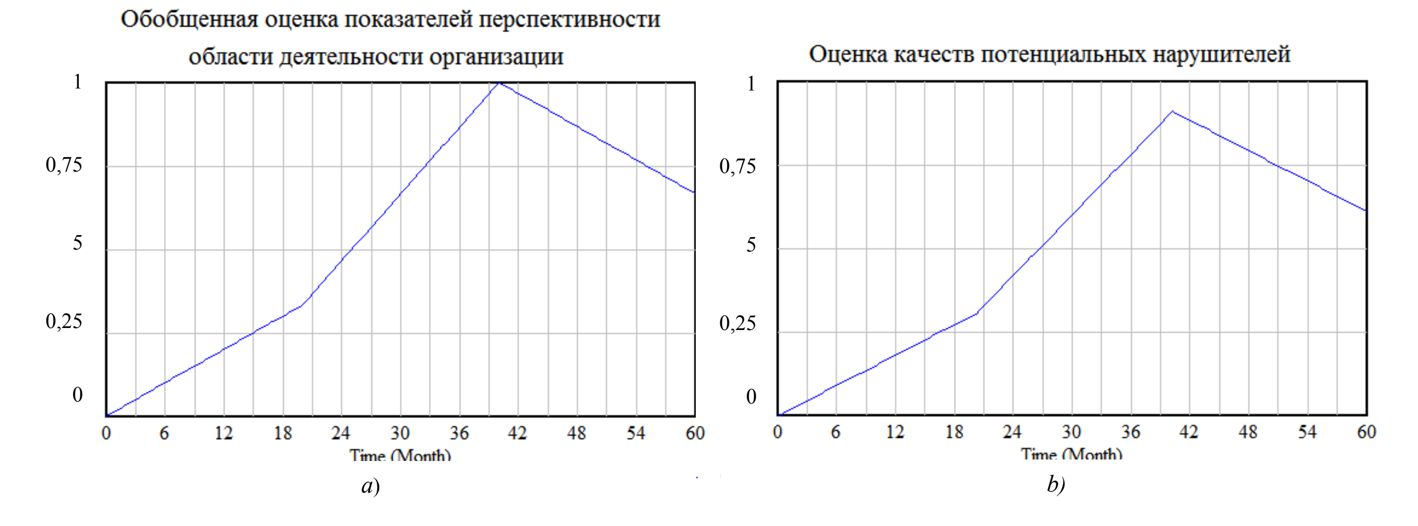


Рис. 1. Потоковая диаграмма

Fig. 1. Streaming graph

Проведение имитаций и анализ результатов. В качестве среды имитационного моделирования для проведения компьютерных имитаций был выбран пакет *Vensim*, разработанный фирмой *Ventana Systems, Inc*. Пакет предназначен для визуализации моделей системной динамики, представляемых в виде причинно-следственных (потоковых) диаграмм, состоящих из накопителей и потоков. Такие диаграммы отображают связи межу элементами системы, их взаимодействие и влияние друг на друга. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2.

Разработанная модель может быть применена для оценки уровня ИБ предприятий, осуществляющих свою деятельность в любой области. Однако для этого необходимо привлечение экспертов с целью формирования оценок показателей перспективности возможных областей деятельности конкретной организации, проведения аудита ее системы защиты.



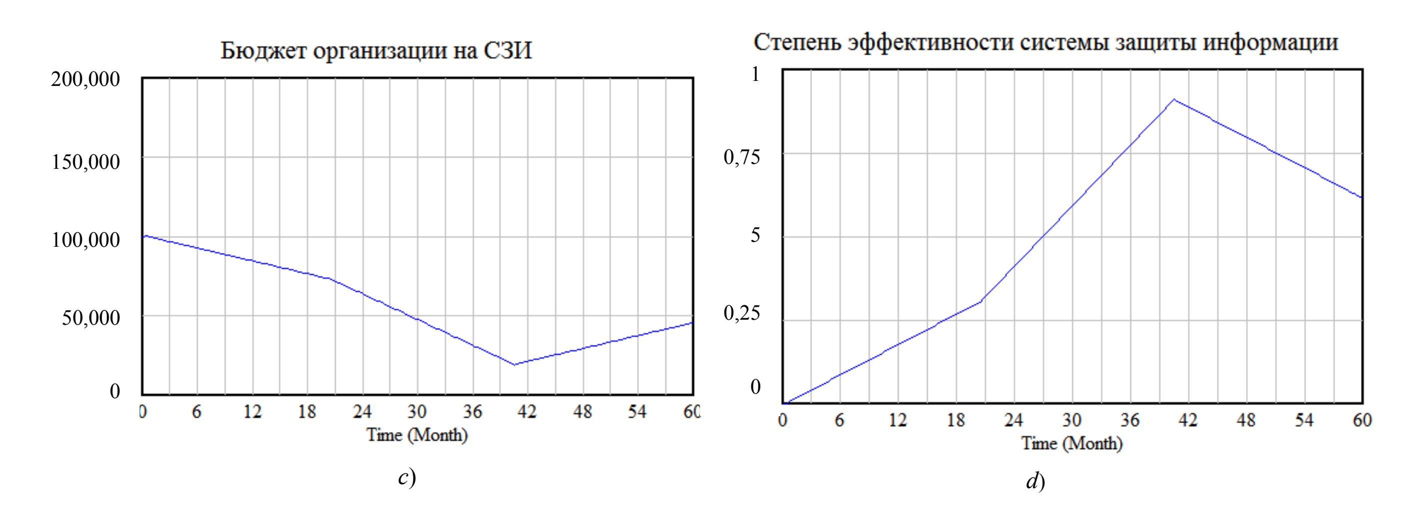


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования

Fig. 2. Simulation modeling outcomes

Заключение. Использование результатов имитационного моделирования обеспечивает поддержку принятия решений специалистами службы безопасности при планировании расходов на защиту информации, внесения изменений в политику безопасности организации, позволяет своевременно и эффективно развивать систему защиты.

Библиографический список

1. Айдинян, А. Р. Проблемы внедрения инновационных методов в сферу информационной безопасности / А. Р. Айдинян // Инновационные исследования : проблемы внедрения результатов и направления развития: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. — Омск : МЦИИ «Омега сайнс», 2016. — Ч. 2. — С. 9–11.

2. Черняков, П. В. Двухуровневая система оценки средств защиты компьютерной информации от утечек / П. В. Черняков, А. Р. Айдинян, О. Л. Цветкова // Инновационная наука. — 2016. — № 3–3. — С. 140–144.

3. Цветкова, О. Л. Интеллектуальная система оценки информационной безопасности предприятия от внутренних угроз / О. Л. Цветкова, А. Р. Айдинян // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 8 (122). — С. 48–53.

4. Иванов, Е. В. Методы имитационного моделирования подсистемы безопасности процессингового центра / Е. В. Иванов, А. И. Иванова // Вестник российского нового ун-та. — 2010. — № 3. — С. 67–73.

5. Sarriegi, J.M., Santos, J., Torres, J.M., Imizcoz, D., Plandolit, A.L. Modeling Security Management of Information Systems: Analysis of an Ongoing Practical Case // Conference Proceedings: the 24th International Conference of the System Dynamics Society. — Nijmegen, the Netherlands, 2006.

6. Лукьянов, В. Ф. Имитационное моделирование многоочагового разрушения с учетом неоднородного распределения номинальных напряжений / В. Ф. Лукьянов, С. С. Ассауленко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — № 4 (83). — С. 31–36.

7. Бутов, А. А. Стохастическое имитационное моделирование механизмов укорочения теломер клеток в процессах старения и развития патологических отклонений / А. А. Бутов, М. А. Карев, С. А. Хрусталев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14. — № 1 (76). — С. 98–109.

8. Городнова, Н. В. Имитационное моделирование устойчивости деятельности государственно-частного партнерства в строительстве / Н. В. Городнова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2 (63), вып. 1. — С. 73–80.

9. Кантор, О. Г. Построение моделей системной динамики в условиях ограниченной экспертной информации / О. Г. Кантор, С. И. Спивак // Информатика и ее применение. — 2014. — Т. 8, № 2. — С. 111–121.

10. Борщев, А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. В. Борщев // Имитационное моделирование. Теория и практика : сб. докл. II всеросс. науч.-практ. конф. ИММОД–2005. — Санкт-Петербург : ЦНИИТС, 2005. — Т. 1. — С. 11–24.

11. Wolstenholme, E. F. System enquiry : a system dynamic approach. — Chichester, England : John Wiley and Sons, 1990. — 238 p.

12. Forrester, J. World dynamics. — Wright-Allen Press, 1971. — 144 p.

References

1. Aydinyan, A.R. Problemy vnedreniya innovatsionnykh metodov v sferu informatsionnoy bezopasnosti. [Problems of introduction of innovative methods in the information security area.] Innovatsionnye issledovaniya: problemy vnedreniya rezul'tatov i napravleniya razvitiya: sb. st. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Innovative research: problems of results implementation and

tendencies of development: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.] Omsk: MTsII "Omega Science", 2016, part 2, pp. 9–11 (in Russian).

2. Chernyakov, P.V., Aydinyan, A.R., Tsvetkova, O.L. Dvukhurovnevaya sistema otsenki sredstv zashchity komp'yuternoy informatsii ot utechek. [A two-level system for assessing means of leak protection of computer information.] Innovatsionnaya nauka, 2016, no. 3–3, pp. 140–144 (in Russian).

3. Tsvetkova, O.L., Aydinyan, A.R. Intellektual'naya sistema otsenki informatsionnoy bezopasnosti predpriyatiya ot vnutrennikh ugroz. [Intelligent system evaluation information security of the enterprise from internal threats.] Herald of Computer and Information Technologies, 2014, no. 8 (122), pp. 48–53 (in Russian).

4. Ivanov, E.V., Ivanova, A.I. Metody imitatsionnogo modelirovaniya podsistemy bezopasnosti protsessingovogo tsentra. [Imitation modeling methods of security subsystems of a processing center.] Vestnik of Russian New University, 2010, no. 3, pp. 67–73 (in Russian).

5. Sarriegi, J.M., Santos, J., Torres, J.M., Imizcoz, D., Plandolit, A.L. Modeling Security Management of Information Systems: Analysis of an Ongoing Practical Case. Conference Proceedings: the 24th International Conference of the System Dynamics Society. Nijmegen, the Netherlands, 2006.

6. Lukyanov, V.F., Assaulenko, S.S. Imitatsionnoe modelirovanie mnogoochagovogo razrusheniya s uchetom neodnorodnogo raspredeleniya nominal'nykh napryazheniy. [Simulation of multicentric destruction with regard for inhomogeneous distribution of rated voltage.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 4 (83), pp. 31–36 (in Russian).

7. Butov, A.A., Karev, M.A., Khrustalev, S.A. Stokhasticheskoe imitatsionnoe modelirovanie mekhanizmov ukorocheniya telomer kletok v protsessakh stareniya i razvitiya patologicheskikh otkloneniy. [Stochastic simulation modeling of cell telomere shortening mechanisms in ageing and disturbance development processes.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 1 (76), pp. 98–109 (in Russian).

8. Gorodnova, N.V. Imitatsionnoe modelirovanie ustoychivosti deyatel'nosti gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v stroitel'stve. [Simulation modeling of work stability of state-private partnership in construction.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 2 (63), iss. 1, pp. 73–80 (in Russian).

9. Kantor, O.G., Spivak, S.I. Postroenie modeley sistemnoy dinamiki v usloviyakh ogranichennoy ekspertnoy informatsii. [Construction of system dynamics models in conditions of limited expert information.] Informatics and Applications, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 111–121 (in Russian).

10. Borshchev, A.V. Prakticheskoe agentnoe modelirovanie i ego mesto v arsenale analitika. [Practical agent modeling and its place in the analyst's toolkit.] Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika: sb. dokl. II vseross. nauch.-prakt. konf. IMMOD–2005. [Simulation modeling. Theory and practice: Proc. II All-Russian Sci.-Pract. Conf. IMMOD–2005.] St. Petersburg: TsNIITS, 2005, vol. 1, pp. 11–24 (in Russian).

11. Wolstenholme, E. F. System enquiry: a system dynamic approach. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1990, 238 p.

12. Forrester, J. World dynamics. Wright-Allen Press, 1971, 144 p.

Поступила в редакцию 22.06.2017
Сдана в редакцию 23.06.2017
Запланирована в номер 15.09.2017

Received 22.06.2017
Submitted 23.06.2017
Scheduled in the issue 15.09.2017

Об авторах:

Цветкова Ольга Леонидовна,
доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного технического университета (ДГТУ) (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4071-6313
olga_cvetkova@mail.ru

Заслонов Сергей Андреевич,
студент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» Донского государственного тех-нического университета (ДГТУ) (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5207-770X
yamdfst@mail.ru

Authors:

Tsvetkova, Olga L.,
associate professor of the Computer Systems and Information Security Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4071-6313
olga_cvetkova@mail.ru

Zaslonov, Sergey A.,
student of the Computer Systems and Information Security Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5207-770X
yamdfst@mail.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621.893 10.23947/1992-5980-2017-17-4-122-128

CO_2 emission trend in public energy sector in EU*

E. Niemierka[1], P. Jadwiszczak[2], M. A. Sayegh[3] **
[1,2,3] Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland

Тенденция изменения выбросов CO_2 в государственном энергетическом секторе в ЕС***

Э. Ниемерка[1], П. Ядвищак[2], М. А. Саег[3]**
[1,2,3] Вроцлавская политехника, Вроцлав, Польша

Introduction. The EU public electricity and heat production (PEAHP) sector is mainly based on the conventional fuel combustion and is responsible for 30% of annual CO_2 emission. PEAHP plays an important role toward achieving EU low-carbon future.
Materials and Methods. CO_2 emissions and energy consumption data for two-decades in EU was analysed in each SM due to the sectoral report of the European Environment Agency [1]. The database includes inventories of emission and energy consumption from 1990 to 2011 for 26 EU countries. The statistical data was rated, compared and displayed to show the long-term overviews and trends of the CO_2 emission.
Research Results. The CO_2 emission in EU consists of the sum of emissions from each EU SM. It is diverse, particularly, in the European countries. Due to the EU climate framework actions, the CO_2 emissions under the fuel combustion from PEAHP have decreased, whereas the overall energy consumption was increased.
Discussion and Conclusions. To achieve zero-emission policy in EU, it is necessary to further implementing the emission inventory and to identify the CO_2 emission trend. The two-decade data analysis is essential for the development of future scenarios and the adjustment of pathways for more mitigation targets in every single EU country.

Введение. Общественный сектор производства электроэнергии и тепла ЕС (PEAHP) в основном основан на традиционном сжигании топлива и отвечает за 30% ежегодной эмиссии CO_2. PEAHP играет важную роль в достижении будущего низкоуглеродного угля в ЕС.
Материалы и методы. Данные о выбросах CO_2 и потреблении энергии в течение двух десятилетий в ЕС были проанализированы в каждом SM (государство-член ЕС), в соответствии с отраслевым докладом Европейского агентства по окружающей среде [1]. База данных включает инвентаризацию выбросов и потребления энергии с 1990 по 2011 год для 26 стран ЕС. Статистические данные оценивались, сравнивались и отображались, чтобы показать долгосрочные обзоры и тенденции эмиссии CO_2.
Результаты исследования. Количество выброса CO_2 в ЕС состоит из суммы выбросов в каждой SM в ЕС. CO_2 разнообразен, в частности, в европейских странах. Благодаря деятельности ЕС в области климата выбросы CO_2 при сжигании топлива из PEAHP уменьшились, в то время как общее потребление энергии было увеличено.
Обсуждение и заключения. Для достижения нулевого выброса в ЕС необходимо продолжить реализацию инвентаризации выбросов и выявить тенденцию изменения выбросов CO_2. Анализ базы данных за два десятилетия имеет важное значение для разработки будущих сценариев и корректировки способов достижения целей, направленных на минимизацию последствий в каждой отдельно взятой стране ЕС.

Keywords: CO_2 emission, public electricity production, public heat production.

Ключевые слова: CO_2, выбросы, общественное производство электричества, общественное производство тепла.

For citation: E. Niemierka, P. Jadwiszczak, M. A. Sayegh. CO_2 emission trend in public energy sector in EU. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 122–128.

Образец для цитирования: E. Niemierka, P. Jadwiszczak, M. A. Sayegh. CO_2 emission trend in public energy sector in EU. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 122–128.

Introduction. The mitigation of climate change requires reduction or inhibition of greenhouse gases (GHG) emission. Different types of contaminants caused incomparable impact on anthropogenic global warming [2-3]. One of the significant major of European Union (EU) climate policy framework is decreasing CO_2 emission from fuel combustion in public

* The research is done within the frame of the independent R&D.
** E-mail: elzbieta.niemierka@pwr.edu.pl, piotr.jadwiszczak@pwr.edu.pl, ara.sayegh@pwr.edu.pl
*** Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

electricity and heat production (PEAHP) sector. PEAHP contains the sum of three emission categories from: electricity plants, combined heat and power plants and heat only plants [4]. The impact of other pollutants than CO_2 from PEAHP is vanishingly small. EU legislation sets mandatory CO_2 emission reduction targets in all EU Member States (MS) [4-7]. PEAHP based on fuel combustion is responsible for a significant part of the annual CO_2 emissions in the EU, which is slightly decreased to around 220 000 kt CO_2, thus it providing nearly 30% of European emissions as it shown in Figure 1 [1]. The CO_2 emission from fuel combustion in PEAHP depends on the both of the consumed conventional energy (constant and amounted about 15 700 PJ) [1] and the CO_2 emission factor (EF), characterized by the technology of generation. In Europe, enlargement of required electricity and heat is caused by growing demand, which are met by alternative or renewable energy sources with a constant PEAHP energy from fossil fuel combustion.



Fig. 1. CO_2 emission changes over the period 1990 to 2011 in EU.

Рис. 1. Изменения выбросов CO_2 в период с 1990 по 2011 гг. в ЕС.

The EU climate framework actions concerned in decreasing the electricity and heat consumption (by essential energy improvements on consumers side e.g. in buildings, energy systems, etc.) and decreasing CO_2 emission factor (EF) per energy unit (e.g. by fuel switching, improvements in generation technology and distribution efficiency, use of cogeneration, renewable sources etc.). There are many other indicators, which will be discussed and analysed in future papers. The PEAHP as a one of the well-controllably and highly-centralized economic sector allows to national and regional scale large improvements. All changes in PEAHP concerned with large efforts and time-consuming processes.

The CO_2 emission trends in European PEAHP. To determine the CO_2 emission trends, European Environment Agency long-term sectoral database was used [1]. The database includes energy consumption and emission statistics over the period from 1990 to 2011 for 26 EU countries. This investigation illustrates the distribution changes overview and the trends of CO_2 emissions in PEAHP for EU over the period from 1990 to 2011. Figure 2 shows statistical analyses of inter-annual variations of CO_2 emissions range in EU countries over the period 1990 to 2011.

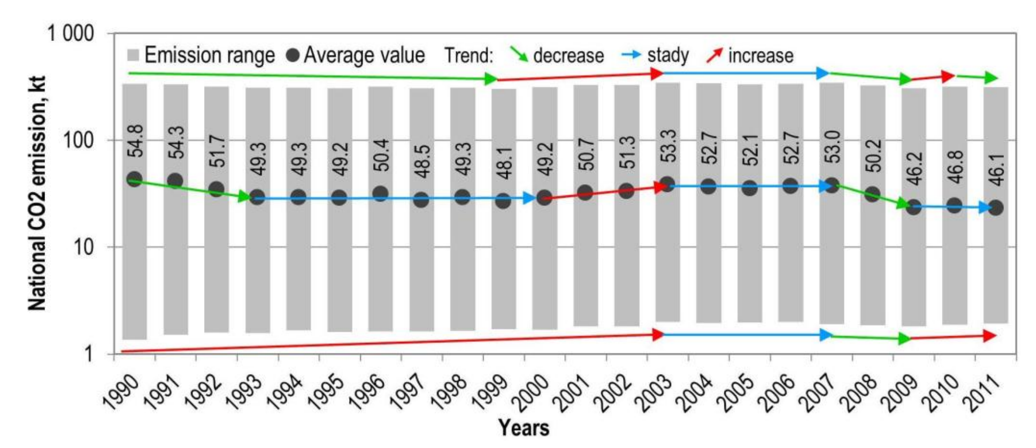


Fig. 2. CO_2 emissions range in EU countries from 1990 to 2011.

Рис. 2. Диапазон выбросов CO_2 в странах ЕС с 1990 по 2011 гг.

The maximum national emissions come from German PEAHP and they are semi stable (over 300 kt CO_2/a) [1]. The variability of maximum could be divided into four periods: stable decrease until 1999, the unfavourable growth over the period 1999 to 2003, the stable steady emission between 2003 to 2007 and slow decrease with fluctuations after 2007. The analysis of obtained results are related to energy consumption and the impurities of PEAHP intensity. The minimum national emissions came from the smaller EU countries like MLT, LVA or CYP with emissions less than 2 kt CO_2/a [1]. The variability of minimum emissions could be divided into four periods: the unfavourable growth until 2003, the slight fluctuations between 2003 to 2007, the steady and stable decrease between 2007 to 2009, small and short-term growth after 2011. These trends are related to the development in countries economy and the increase in energy consumption compared to 1990.

The average national emissions describe the total variability of emissions in all EU countries and illustrates the two-decades trend (from 1990 to 2011) as fluctuating with downward tendency. The six noticeable periods are: significant decline before 1993, stabilization from 1993 to 2000, considerable increase from 2000 to 2003, slightly fluctuating stabilization from 2003 to 2007, dynamic decline from 2007 to 2009 and stabilization until 2011. The CO_2 emission tendency is a complex issue that has been affected by legislation, economy, ecology and technical development. In this reason stabilization of the emission averages can be caused by different reasons, which can be divided into: 1) increase the minima with decreases maxima (1993-1999), 2) stabilization of both minima and maxima (2003-2007) and 3) opposing variation of minima and maxima (2009-2011). The emission variations reflect the political changes of the 90s, the European economic crisis and energy legislations. The stabilized diminishing of EU emissions average is an evident result of EU climate change mitigation actions accompanied by both of economic and ecological development in Europe.

To clarify a situation of PEAHP emission distribution in EU countries the national CO_2 emission factors (EF) were assumed, as a relation indicator between the consumed energy and emitted CO_2 during all cycles of electricity and heat production and distribution. The low values of EF are concerned with clean and environmentally friendly technologies, while high EF are accompanied by old and inefficient technologies of PEAHP. The decreasing trend of EF in Figure 3 shows the technology and fuels improvements in European PEAHP over the period from 1990 to 2011.

Figure 3 shows the favourable downward trend of EF during two-decades in European countries, with the episode of growth since 2008. The trend of minimum EF shows the more significant decline with SWE as the European leader in national EF limitation. The average of EF in EU constantly falls down, it`s around 0,78% per year, which reflects the constant PEAHP development in Europe and right direction of EU`s climate protection framework actions. The decrease of EF standard deviation reflects that all national values tend to bring closer to the diminishing average value of EU national CO_2 emission.

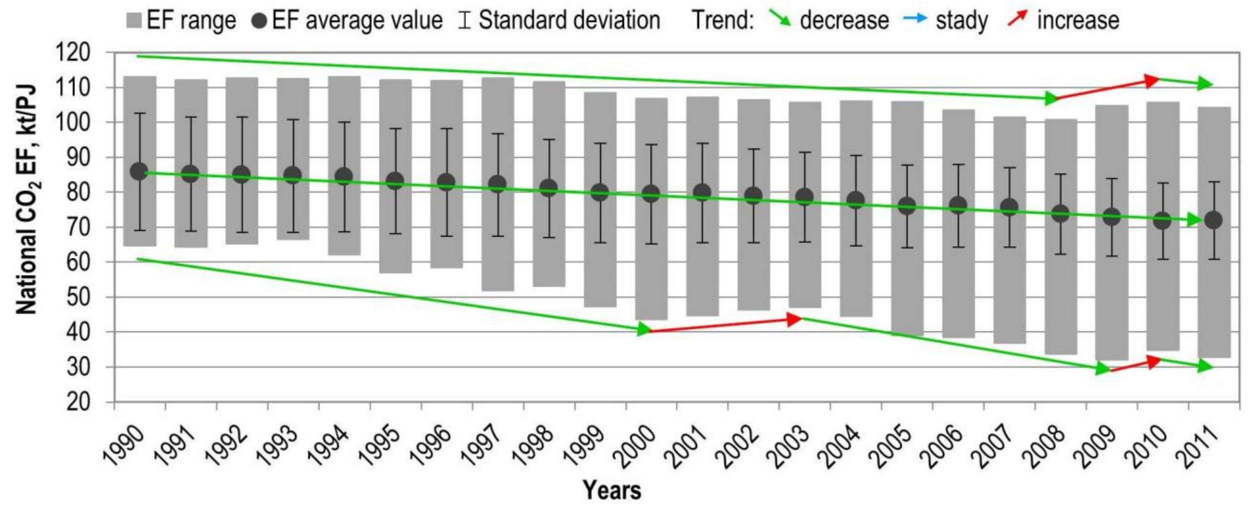


Fig. 3. Changes and trends of national EF in EU countries-from 1990 to 2011.

Рис. 3. Изменения и тенденции EF (коэффициент выбросов) в странах ЕС с 1990 по 2011 гг.

CO_2 emission changes from PEAHP in MS of EU. CO_2 emission in EU consists of the sum of all MS national emissions of EU. To estimate the share of CO_2 emission for each EU country, the distribution value of CO_2 emissions from 1990 to 2011 was analysed as it shown in Figure 4A. The distribution of CO_2 emissions at the national level was very high and achieve from 1.9 (MLT) to 314.1 (DEU) kt CO_2 in 2011 [1]. The top CO_2 emitter countries were DEU, POL, GBE and ITA which emits more than 60% of EU emission and haven't changed their place in the emission classification from 1990. These are large population and area countries with large energy consumption. Table 1 shows the statistic CO_2 emission changes for EU countries from PEAHP between 1990 to 2011. The most favourable change from 12.0 to 2.9 kt CO_2 (76.0%) was observed for LTU, while the most unfavourable change from 1.7 to 3.7 kt CO_2 (-121.6%) was observed for CYP. The CO_2 emission from PEAHP strongly depends on energy consumption, but the changes of both values have not always been analogous. Figure 4B shows the distributions PEAHP energy consumption in EU countries, as a comparison of 1990 and 2011. With reference to the data shown in the Table 1, the most favourable change from 185.6 to 61.1 PJ (67.1%) was observed for LTU, while the most unfavourable change from 101.7 to 236.7 PJ (132.7%) was for SWE. The countries characterized by high CO_2 emission from PEAHP were the countries with energy-intensive economies like (DEU, GBE, POL, etc.). To compare the emissions in EU countries, national emission factor (EF) was assumed, as a relation between the national energy consumption and the national CO_2 emission from PEAHP (Figure 4C).

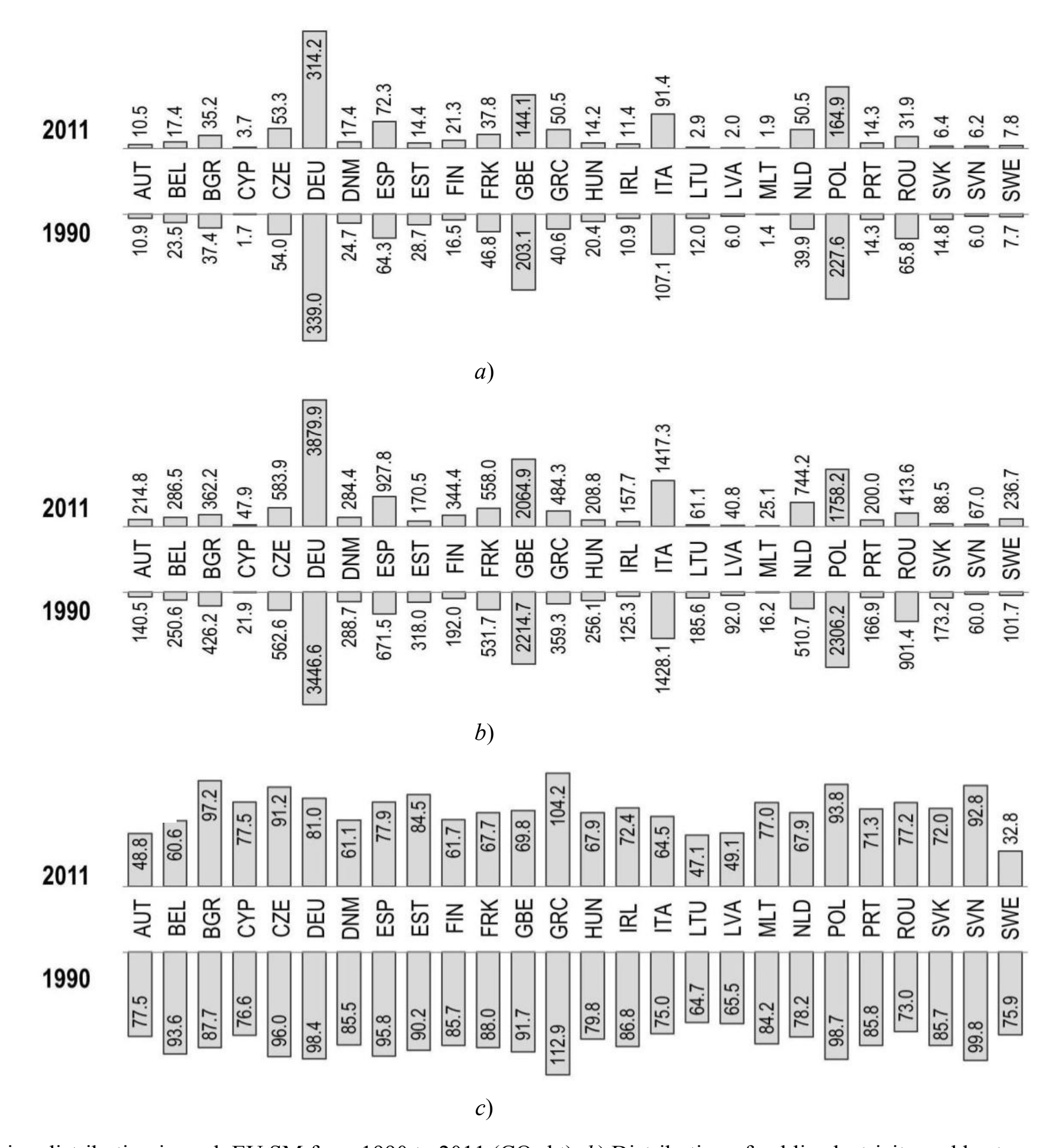


Fig. 4. *a*) CO_2 emission distribution in each EU SM from 1990 to 2011 (CO_2 kt); *b*) Distribution of public electricity and heat consumption in EU countries from 1990 to 2011 (PJ); *c*) EF distribution in each EU country from 1990 to 2011 (kt CO_2/PJ).

Рис. 4. a) Распределение выбросов CO_2 в каждой стране ЕС с 1990 по 2011 гг. (CO_2 кт); b) Распределение общего потребления электроэнергии и тепла в странах ЕС с 1990 по 2011 гг. (ПДж); c) Распределение факторов выбросов в каждой стране ЕС с 1990 по 2011 гг. (CO_2 кт / ПДж).

The analysis of national EF value in EU each country includes three rating categories of EF values distribution in 1990, in 2011 and the changes of EF values during from 1990 to 2011 as shown in Figure 4C. The EF values in particular EU countries are extremely different both in 1990 and 2011. In basic 1990 year the EF value varies from 64.7 in LTU to 112.9 kt CO_2 /PJ in GRC. In 2011 year the minima value achieved was 32.8 in SWE and maxima 104.2 kt CO_2 /PJ in GRC.

Table 1

Таблица 1

National statistical relative changes of PEAHP emission and energy consumption from 1990 to 2011 in EU countries

Национальные статистические относительные изменения выбросов PEAHP и потребления энергии с 1990 по 2011 гг. в странах ЕС.

Country	Energy consumption	CO_2 emission	CO_2 EF
AUT	52.8%	-3.6%	-37.0%
BEL	14.3%	-26.1%	-35.3%
BGR	-15.0%	-5.7%	10.9%
CYP	119.0%	121.6%	1.2%
CZE	3.8%	-1.4%	-5.0%
DEU	12.6%	-7.3%	-17.7%

Country	Energy consumption	CO_2 emission	CO_2 EF
DNM	-1.5%	-29.7%	-28.6%
ESP	38.2%	12.3%	-18.7%
EST	-46.4%	-49.7%	-6.3%
FIN	79.4%	29.2%	-28.0%
FRK	4.9%	-19.3%	-23.1%
GBE	-6.8%	-29.1%	-23.9%
GRC	34.8%	24.3%	-7.7%
HUN	-18.5%	-30.7%	-15.0%
IRL	25.8%	5.0%	-16.6%
ITA	-0.8%	-14.7%	-14.0%

Country	Energy consumption	CO_2 emission	CO_2 EF
LTU	-67.1%	-76.0%	-27.2%
LVA	-55.7%	-66.8%	-25.1%
MLT	54.6%	41.3%	-8.6%
NLD	45.7%	26.5%	-13.2%
POL	-23.8%	-27.5%	-4.9%
PRT	19.8%	-0.4%	-16.9%
ROU	-54.1%	-51.5%	5.8%
SVK	-48.9%	-57.0%	-15.9%
SVN	11.8%	3.9%	-7.0%
SWE	132.7%	0.5%	-56.8%

The most significant national EF changes were characterised by 10.9% increase in BGR (from 88.7 to 97.2 kt CO_2/PJ) and by 56.8% decrease in SWE (from 75.9 to 32.8 kt CO_2/PJ). Table 1 shows the detailed changes of EF in each EU country. Such variations are due to different levels of national PEAHP technology, EF baseline and country economic potential.

Changes of CO_2 emission profiles from PEAHP in each EU country. The national CO_2 emissions are dynamic values, which depend on time, political, economic, technology progress and national legislation. On the base of European Environment Agency data [1] 26 illustrative profiles of CO_2 emission and energy consumption from EU each national PEAHP were provided as shown in Figure 5. The line in each profile represents CO_2 emission and the grey area expresses the energy consumption from 1990 to 2011. All presented national profiles start at theoretical point which join the emission and energy consumption and illustrate the base proportions in 1990.

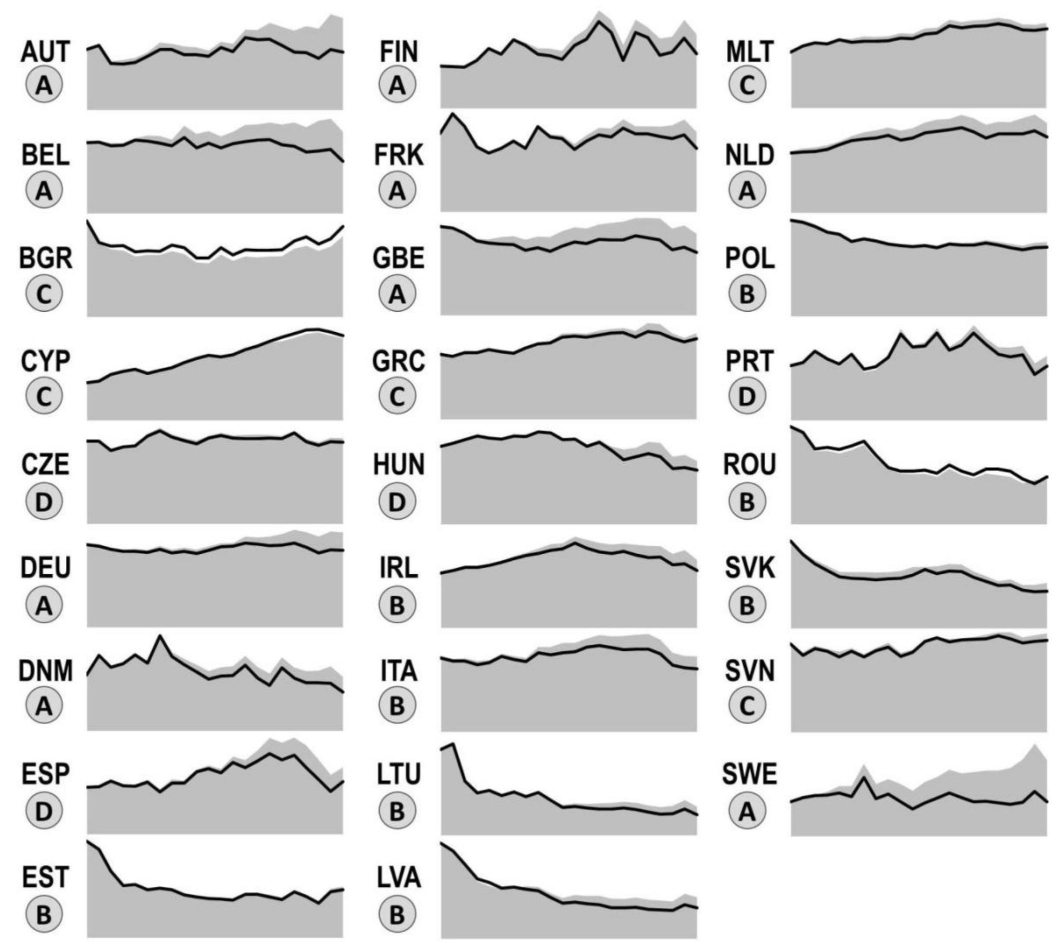


Fig. 5. Illustrative profiles of CO_2 emissions and energy consumption from PEAHP in the period from 1990 to 2011.

Рис. 5. Иллюстративные профили выбросов CO_2 и потребления энергии от PEAHP в период с 1990 по 2011 гг.

The presented results indicate the strong dependency of national CO_2 emission and PEAHP energy consumption, which can be classified into four groups as it shown in Table 2. The group A includes the countries where the CO_2 emissions decrease with increasing energy consumption. In group B the emissions and energy consumptions are decreasing simultaneously. Group C is characterized by increased emissions and energy consumption simultaneously. Group D includes MS of EU with stable emissions and energy consumption or with CO_2 reduction due to improvements in the recent years.

Table 2

Таблица 2

Grouping EU countries due to PEAHP emissions and energy consumptions

Группировка стран ЕС из-за выбросов PEAHP и потребления энергии

Group	CO_2 emission	Energy consumption	EU Countries
A	decrease	increase	AUT, BEL, DEU, DNM, FIN, FRK, GBE, NLD, SWE
B	decrease	decrease	EST, ITA, IRL, LTU, LVA, POL, ROU, SVK
C	increase	increase	BGR, CYP, GRC, MLT, SVN
D	stable or improvement		stable: CZE or improvements in recent years: ESP, HUN, PRT

The groups A and B present the positive trends in national PEAHP and economy. According to EU climate legislation the CO_2 reduce actions do not hamper the national economic growth without energy prices increasing [4,7].Classified as category C countries consume increasing value of energy from fuel combustion with slightly improvements in PEAHP. At the current stage in these countries the economic development seems to be the major target than environmental issue.

The analysis show positive tendency in European PEAHP. CO_2 emissions from public energy sector are successively reduced by improvements in energy production technologies and reduce of fuel combustion.

Conclusions. The assessment and classification of environmental impact of public electricity and heat production sector in EU is a complex issue. The PEAHP from conventional fuel combustion is still responsible for a significant portion of annual CO_2 emission in EU. Since 1990 the EU climate legislations and framework actions let to decrease CO_2 emissions from fuel combustion in PEAHP, with slightly rising in overall energy consumption in Europe. This has been achieved in two main ways: first by reduction of energy consumption, second by improvement in PEAHP technologies. The EU climate policy takes into account the countries potential and sets adequate ecological goals and environmental targets. On the one hand, this leads to changes in pace and size of CO_2 emissions in EU individual countries and on the other hand it accelerates the progress of environmental friendly actions in Europe. Environment legislations are the cornerstone of the EU's strategy to improve the climate and energy economy.

The ”top four” countries with the largest national CO_2 emissions from PEAHP haven’t changed from 1990 to 2011. There are also significant relative emission changes e.g. CYP, where the CO_2 emissions increased over twice in the same period, while LTU decreased CO_2 emission over three times for the same period.

The average CO_2 emission in Europe has a downward trend. In all EU countries the national CO_2 emissions have changed: sometimes it has fallen and in others has even risen.

The availability of data and multi-range dependencies shape the image of CO_2 emissions from European and national PEAHP. Regular monitoring of European national and regional emission changes allows the evaluation and correction of the CO_2 reduction scenarios and actions to achieve near zero-carbon PEAHP.

References

1. European Environment Agency, National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism, 2013, 15p.
2. Ogden J., Anderson L., Sustainable Transportation Energy Pathways: A Research Summary for Decision Makers. Part 2, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis (ITS), 2011, pp. 133-169.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2014. Synthesis Report, 2014, 30p.
4. Regulation (EU) No. 525/2013 of the European Parliament and of the Council on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and for reporting other information at national and Union level relevant to climate change and repealing Decision, No. 280/2004/EC, 13p.
5. European Commission, Climate strategies & targets. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en (accessed: 12.09.2017)
6. European Environment Agency, Greenhouse gas emission trends, 2017. Available at: https://www.eea.europa.eu (accessed: 12.09.2017)

7. W. J. Antholis. The Good, the Bad, and the Ugly: EU-U.S. Cooperation on Climate Change, 2009. Available at: www.brookings.edu (accessed: 12.09.2017)

Библиографический список

1. European Environment Agency, National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism, 2013, 15p.
2. Ogden J., Anderson L., Sustainable Transportation Energy Pathways: A Research Summary for Decision Makers. Part 2, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis (ITS), 2011, pp. 133-169.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2014. Synthesis Report, 2014, 30p.
4. Regulation (EU) No. 525/2013 of the European Parliament and of the Council on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and for reporting other information at national and Union level relevant to climate change and repealing Decision, No. 280/2004/EC, 13p.
5. European Commission, Climate strategies & targets. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en (accessed: 12.09.2017)
6. European Environment Agency, Greenhouse gas emission trends, 2017. Available at: https://www.eea.europa.eu (accessed: 12.09.2017)
7. W. J. Antholis. The Good, the Bad, and the Ugly: EU-U.S. Cooperation on Climate Change, 2009. Available at: www.brookings.edu (accessed: 12.09.2017)

Received 15.07.2017
Submitted 16.07.2017
Scheduled in the issue 20.09.2017

Поступила в редакцию 15.07.2017
Сдана в редакцию 16.07.2017
Запланирована в номер 20.09.2017

Authors:

Niemierka, Elżbieta,
MSc, Wrocław University of Science and Technology (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
elzbieta.niemierka@pwr.edu.pl

Jadwiszczak, Piotr,
Wrocław University of Science and Technology (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
piotr.jadwiszczak@pwr.edu.pl

Sayegh, Marderos Ara,
Wrocław University of Science and Technology (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
ara.sayegh@pwr.edu.pl

Об авторах:

Ниемарка Эльжбета,
Магистр гуманитарных наук, Вроцлавская политехника (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
elzbieta.niemierka@pwr.edu.pl

Ядвищак Петр,
Вроцлавская политехника (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
piotr.jadwiszczak@pwr.edu.pl

Саег Мардирос Ара,
Вроцлавская политехника (Poland, 50-373, Wroclaw, ul. Norwida 4/6 (building C-6)
ara.sayegh@pwr.edu.pl

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 631.22.018 10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135

Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства*

Б. Ч. Месхи[1], Н. В. Лимаренко[2], В. П. Жаров[3], Б. Г. Шаповал[4]
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Creation of mathematical model for estimating energy intensity of livestock wastes disinfection***

B. C. Meskhi[1], N. V. Limarenko[2], V. P. Zharov[3], B. G. Shapoval[4]
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассмотрен перспективный способ обеззараживания стоков животноводства. Суть способа заключается в комплексном физико-химическом воздействии переменного магнитного поля в сочетании с химическим реагентом. Устройством реализации предложенного способа является индуктор. В качестве параметра, характеризующего энергетическую эффективность технологического процесса обеззараживания стоков животноводства, выбрана удельная электрическая энергоёмкость. Для повышения эффективности исследования технологического процесса обеззараживания стоков животноводства предлагается использовать математическую теорию планирования эксперимента.
Материалы и методы. В ходе проведения данного исследования использовались методы: инструментального, прямого и косвенного измерения, статистической обработки данных, математическая теория планирования эксперимента.
Результаты исследования. Экспериментально исследовано влияние технологических факторов на энергетическую эффективность технологического процесса обеззараживания стоков животноводства. На основании полученных данных выполнено ранжирование по силе влияния технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса. Установлена несущественная степень влияния оценок коэффициентов парного взаимодействия, на что указывает их отсутствие в математической модели.
Обсуждение и заключения. Создана математическая модель технологического процесса обеззараживания стоков животноводства, позволяющая оценить влияния технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса обеззараживания.

Introduction. A perspective method of the livestock wastes disinfection is considered. The key point of the method is in complex physical and chemical impact of the variable magnetic field coupled with a chemical reagent. The device for implementing the proposed technique is an inductor. Electric energy intensity is selected as a parameter characterizing the energy efficiency of the of livestock wastes disinfection process. To increase the efficiency of investigating the livestock wastes disinfection process, it is proposed to use the mathematical experimental design theory.
Materials and Methods. In the course of this research, the following techniques were used: instrument, direct and indirect methods of measurement, statistical processing technique, and mathematical experimental design theory.
Research Results. The effect of technological factors on the energy efficiency of the livestock wastes disinfection process is experimentally investigated. On the basis of the data obtained, the strength effect ranking of the technology factors on the specific electrical energy capacity of the process is performed. A noncritical degree of impact of evaluating the pair-wise interaction coefficients is established. Their absence in the mathematical model suggests this.
Discussion and Conclusions. A mathematical model of the livestock wastes disinfection process which allows evaluating the effect of the technology factors on the specific electrical energy intensity of the given process is developed.

Ключевые слова: обеззараживание, стоки животноводства, индуктор, математическая теория планирования эксперимента, математическая модель.

Keywords: disinfection, livestock wastes, inductor, mathematical experimental design theory; mathematic model.

Образец для цитирования: Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства. Б. Ч. Месхи [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 129–135.

For citation: B.C. Meskhi, N.V. Limarenko, V.P. Zharov, B.G. Shapoval. Creation of mathematical model for estimating energy intensity of livestock wastes disinfection. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 129–135

Введение. Одним из основных факторов загрязнения окружающей среды являются промышленные стоки сельского хозяйства. Наибольшую опасность представляют сточные воды животноводства (далее стоки), являющиеся

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФСИ (fasie.ru), грант № 0032776.
**E-mail: reception@donstu.ru ,limarenkodstu@yandex.ru, zharovvp@mail.ru, nba-shapoval@yandex.ru
*** The work was fulfilled with financial support of FSI (fasie.ru), grant № 0032776.

источником большого количества заболеваний, утилизация которых невозможна без их обеззараживания. Наиболее перспективным способом обеззараживания стоков является комплексное физико-химическое воздействие вращающегося переменного магнитного поля и активного хлора [1]. Энергетическим параметром качества процесса обеззараживания является удельная энергоёмкость процесса. Соответственно, создание математической модели, позволяющей оценить влияние технологических факторов на энергоёмкость процесса, является актуальной задачей.

Решить эту проблему можно используя математическую теорию планирования эксперимента.

Целью данного исследования являлось создание математической модели технологического процесса обеззараживания, оценивающей его энергетическую эффективность.

Экспериментальное исследование. Для оценки энергетической эффективности процесса необходимо рассматривать затраты электрической энергии на получение единицы готовой продукции, то есть удельной электрической энергии. В качестве единицы готовой продукции лучше всего рассматривать её объём.

На основании вышеизложенного, при оценке энергии, затраченной на технологический процесс, необходимо рассматривать активную составляющую удельной электрической энергии, расходуемой на получение единицы готовой продукции.

Представленные в табл. 1 факторы были приняты в качестве способных оказывать влияние на технологический процесс обеззараживания стоков комплексным физико-химическим воздействием в индукторе.

Таблица 1

Table 1

Факторы и уровни их варьирования в натуральных переменных

Factors and levels of their variability in physical variables

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов		
		$X_i = -1$	$X_i = 0$	$X_i = +1$
Заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора ρ в %	X_1	0,74	2,96	5,18
Отношение длины рабочих тел к их диаметру *l/d*	X_2	5	15	25
Магнитная индукция *B* в мТл	X_3	40	60	80
Концентрация активного хлора ω в мг/л	X_4	6	12	18
Продолжительность воздействия *t* в с	X_5	2	4	6

В качестве условий исследования рассматривались [2–5]:

– частота колебаний электрического тока в сети *f*, Гц;

– материал рабочих тел.

Кибернетическая модель системы (факторы-условия-объект исследования-параметры показатели качества), иллюстрирующая их взаимосвязь, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема кибернетической модели системы при исследовании влияния параметров технологического процесса обеззараживания стоков на его качество:
ρ — заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора; *l/d* — отношение длины рабочих тел к их диаметру; *B* — магнитная индукция; ω — концентрация активного хлора; *t* — продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел; *f* — частота колебаний электрического тока в сети; материал рабочих тел;
$N_{уээ}$ — удельная электрическая энергоёмкость процесса

Fig. 1 Cybernetic system model structure when studying effect of livestock wastes disinfection process parameters on their quality:
ρ – occupancy of inductor operating area by working medium; l/d – working bodies length - their diameter ratio; B –magnetic induction; ω – concentration of active chlorine; t –duration of magnetic field, active chlorine and working medium combined exposure; f – network current oscillation frequency; working medium material; $N_{уээ}$ *– process specific electric energy*

Экспериментальные исследования проводились на индукторе, устройство и принцип действия которого описаны в [2].

Анализ источников [6, 7] и практика решения задач с помощью методов планирования эксперимента показывают, что в большинстве случаев процесс обеззараживания невозможно описать математической моделью первого порядка ввиду ее неадекватности. Значительная кривизна поверхности отклика, как правило, не позволяет описывать её уравнением первого порядка даже в весьма узкой области факторного пространства. В таких случаях необходимо описывать исследуемый процесс с помощью полиномов более высоких порядков, например, второго, имеющего вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} b_{ij} x_i x_j$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_j — коэффициенты, характеризующие силу влияния свободных, линейных, квадратичных и эффектов взаимодействия членов уравнения.

Существует большое количество планов эксперимента, решающих определённые задачи. При выборе вида плана для конкретного эксперимента необходимо использовать характерный показатель решения задачи, по значению которого оценивается оптимальность найденного решения, то есть, максимальное удовлетворение поставленных требований. Таким показателем является критерий оптимальности плана — мера эффективности плана.

В настоящее время используется свыше 20 различных критериев оптимальности планов [8], которые подразделяются на две основные группы. К первой группе относят критерии, связанные с ошибками оценок коэффициентов, ко второй относятся критерии, связанные с ошибкой оценки поверхности отклика.

Ввиду того, что целью следующего этапа исследования является оптимизация параметров технологического процесса обеззараживания, что требует наиболее точное описания поверхности отклика, предпочтительным являются критерий *G*-оптимальности.

Из всего множества *G*-оптимальных планов или близких к ним по свойствам, с учётом количества рассматриваемых факторов, наиболее предпочтительным является план Хартли Ha_5. Этот план имеет минимальное количество опытов и предпочтительные статистические характеристики, по сравнению с аналогичными планами, поэтому рекомендуется для создания моделей в виде полинома второго порядка [9, 10].

Матрица плана Ha_5 в кодированных переменных представлена в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Матрица плана и результаты эксперимента

Design matrix and experimental results

Номер опыта	Уровни факторов					Удельная электрическая энергоёмкость	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$\bar{y}_{уээ}$	$\hat{y}_{уээ}$
1	-1	-1	-1	-1	+1	7,00	7,02
2	+1	-1	-1	-1	-1	0,20	0,19
3	-1	+1	-1	-1	-1	3,60	3,59
4	+1	+1	-1	-1	+1	1,60	1,59
5	-1	-1	+1	-1	-1	9,60	9,62
6	+1	-1	+1	-1	+1	7,60	7,62
7	-1	+1	+1	-1	+1	11,00	11,02
8	+1	+1	+1	-1	-1	4,20	4,19
9	-1	-1	-1	+1	-1	4,60	4,59
10	+1	-1	-1	+1	+1	2,60	2,59
11	-1	+1	-1	+1	+1	6,00	5,99
12	+1	+1	-1	+1	-1	0,20	0,17
13	-1	-1	+1	+1	+1	12,00	12,02
14	+1	-1	+1	+1	-1	5,20	5,19
15	-1	+1	+1	+1	-1	8,60	8,60
16	+1	+1	+1	+1	+1	6,60	6,59
17	-1	0	0	0	0	9,30	9,25
18	+1	0	0	0	0	4,90	4,96
19	0	-1	0	0	0	4,60	4,55

20	0	+1	0	0	0	3,60	3,66
21	0	0	-1	0	0	3,10	3,16
22	0	0	+1	0	0	8,10	8,05
23	0	0	0	-1	0	5,60	5,55
24	0	0	0	+1	0	5,60	5,66
25	0	0	0	0	-1	4,40	4,46
26	0	0	0	0	+1	6,80	6,75
27	0	0	0	0	0	5,60	5,59

Согласно принятому плану было реализовано 27 опытов. Для уменьшения систематических ошибок опыты проводились в случайном порядке. Каждый опыт дублировался три раза.

Полученные в результате опытов средние значения контролируемых параметров представлены в табл. 2.

Проверка полученных значений оценок дисперсий параллельных опытов на однородность по критерию Кохрена показала, что при выбранном уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и степенях свободы числителя $f_{K1} = 2$ и знаменателя $f_{K2} = 27$ расчетные значения G_p меньше критического значения $G_к = 0{,}21$ [11]. Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов справедлива.

После определения оценок коэффициентов, их характеристик и исключения функций из уравнения при статистически незначимых коэффициентах, уравнение регрессии для удельной электрической энергоёмкости принимает вид:

$$y_{уээ} = 5{,}59 - 2{,}14x_1 - 0{,}44x_2 + 2{,}24x_3 + 1{,}14x_5 + 1{,}52x_1^2 - 1{,}48x_2^2 \quad (1)$$

По полученным уравнениям были рассчитаны значения удельной электрической энергоёмкости $\hat{y}_{уээ}$, представленные в табл. 2.

Проверка полученных уравнений на адекватность по F-критерию показала, что при выбранном уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и соответствующих степенях свободы $f_{ад}$ и f_e расчетные значения F_p меньше критического значения $F_к$. Следовательно, гипотеза об адекватности уравнений справедлива.

После подстановки переходных коэффициентов и преобразования уравнение регрессии удельной электрической энергоёмкости приняло вид:

$$\hat{N}_{уээ} = 4{,}815 - 2{,}789\rho + 0{,}400\, l/d + 0{,}112B + 0{,}570\,t + 0{,}308\rho^2 - 0{,}014\, l/d^2 \quad (2)$$

Уравнение (2) даёт возможность рассчитать значения удельной электрической энергоёмкости $N_{уээ}$ для любых точек, находящихся внутри области изучаемого факторного пространства.

На основании экспериментальных данных (табл. 2) были построены графические зависимости, представленные на рис. 2 и 3.

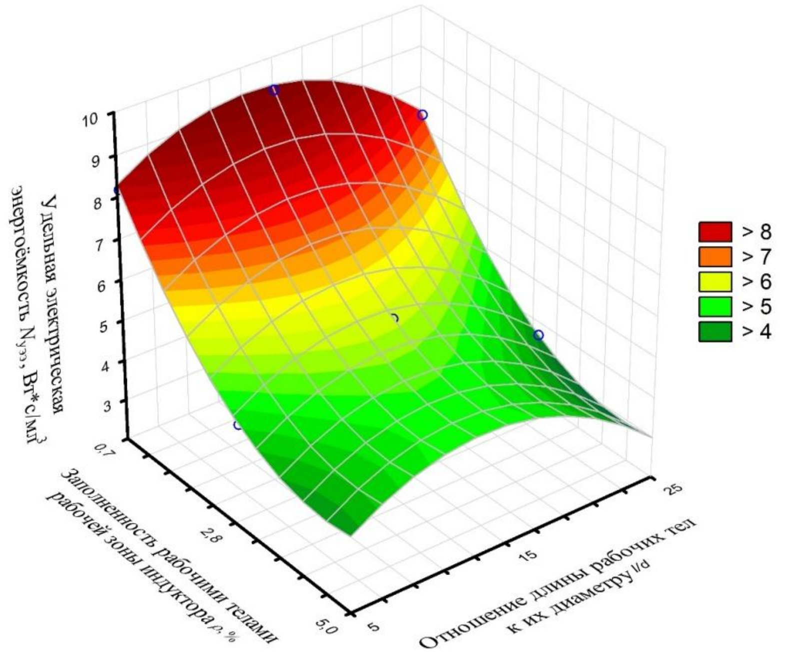


Рис. 2. Зависимость удельной электрической энергоёмкости процесса обеззараживания от факторов, связанных с рабочими телами

Fig. 2. Dependence of specific electric power intensity of disinfection process on factors connected to working medium

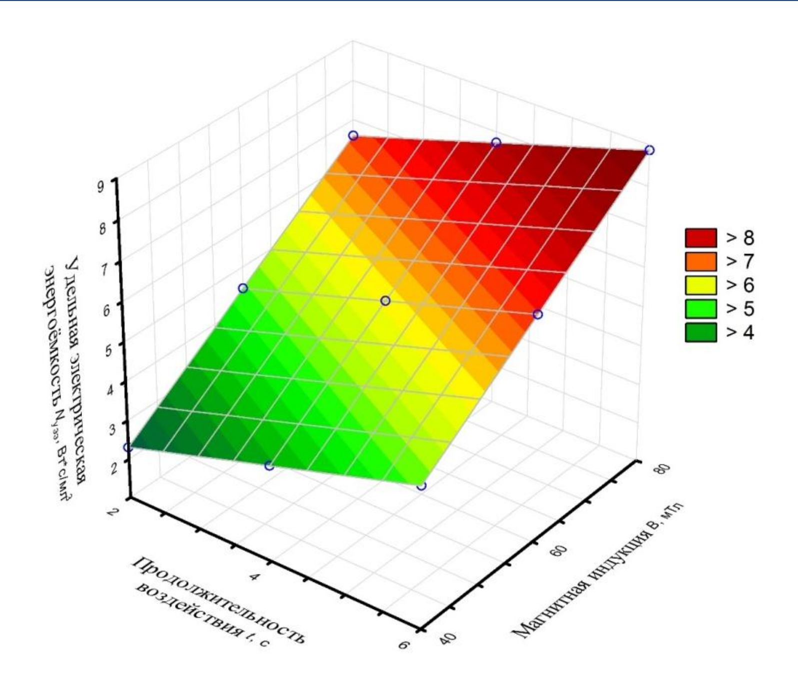


Рис. 3. Зависимость удельной электрической энергоёмкости процесса обеззараживания от магнитной индукции и продолжительности совместного воздействия магнитного поля и рабочих тел

Fig. 3. Dependence of specific electrical energy intensity of disinfection process on magnetic induction and duration of combined exposure of magnetic fields and working medium

Анализ результатов. Анализ результатов опытов и расчётов (табл. 2), уравнений (1), (2) и графических зависимостей (рис. 2, 3) показал:

– уравнение в кодированных (1) и натуральных (2) переменных в виде полинома второй степени адекватно по критерию Фишера характеризуют зависимость удельной электрической энергоёмкости от рассматриваемых факторов при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$. Поэтому оно может служить в качестве математической модели процесса обеззараживания стоков;

При исследовании влияния рассматриваемых факторов в области интереса на удельную электрическую энергоёмкость установлено:

– статистически не значимыми, в рассматриваемом диапазоне факторов, оказались оценки коэффициентов концентрации активного хлора в пробе, на что указывает отсутствие членов уравнения x_4 (1) или в натуральных переменных ω (2);

– заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора ρ существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_1 (1) или в натуральных переменных ρ (2). При этом, с возрастанием значений заполненности рабочими телами рабочей зоны, происходит убывание значений удельной электрической энергоёмкости по квадратичной зависимости, на что указывает существенная оценка коэффициента x_1^2 (1) или в натуральных переменных ρ^2 (2);

– отношение длины рабочих тел к их диаметру l/d существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_2 (1) или в натуральных переменных l/d (2). При этом, с возрастанием значений отношения длины рабочих тел к их диаметру l/d, происходит убывание значений удельной электрической энергоёмкости по квадратичной зависимости, на что указывает существенная оценка коэффициента x_1^2 (1) или в натуральных переменных ρ^2 (2);

– магнитная индукция B существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_3 (1) или в натуральных переменных B (2). При этом, с возрастанием значений магнитной индукции B, происходит возрастание значений удельной электрической энергоёмкости по линейной зависимости, на что указывает несущественная оценка коэффициента x_3^2 (1) или в натуральных переменных B^2 (2);

– концентрация активного хлора в пробе ω не существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывает отсутствие членов уравнения x_4 (1) или в натуральных переменных ω (2);

– продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу t существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов

уравнения x_5 (1) или в натуральных переменных t (2). При этом, с возрастанием значений продолжительности совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу t, происходит возрастание значений удельной электрической энергоёмкости по линейной зависимости, на что указывает несущественная оценка коэффициента x_5^2 (1) или в натуральных переменных t^2 (2);

– несущественными оказались все оценки коэффициентов парного взаимодействия, что указывает на отсутствие эффекта парного взаимодействия рассмотренных факторов;

– сила влияния факторов распределилась следующим образом: магнитная индукция; заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора; продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу; отношение длины рабочих тел к их диаметру.

Заключение. Анализ результатов опытов (табл. 2), расчётов (табл. 2), уравнений (1), (2) и графических зависимостей (рис. 2, 3) позволили оценить влияние ряда технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса, а также наметить гипотезы, объясняющие физическую сущность процессов, происходящих при обеззараживании стоков животноводства путём комплексного физико-химического воздействия магнитного поля и активного хлора.

Библиографический список

1. Лимаренко, Н. В. Анализ способов обеззараживания / Н. В. Лимаренко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения.: сб. тр. 8-й межд. науч.- практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 605–608.

2. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем /Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. — Техника : Киев, 1976. — 144 с.

3. Вершинин, И. Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И. Н. Вершинин, Н.П. Вершинин — Сальск, 2007. — 368 с.

4. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология. / Н. П. Вершинин. — Ростов-на-Дону, 2004. — 314 с.

5. Лимаренко, Н. В. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н. В. Лимаренко [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 1. — С. 136–142.

6. Драйнер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Драйнер, Г. Смит. — Москва : Статистика, 1973. — 392 с.

7. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. — Москва : Наука, 1980. — 228 с.

8. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. — Москва : Наука, 1976. — 390 с.

9. Karl Siebertz. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) / Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. – London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. – 326 p.

10. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1976. — 280 с.

11. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 5-е изд., стер. — Москва : КНОРУС, 2013. — 448 с.

References

1. Limarenko, N.V. Analiz sposobov obezzarazhivaniya. [Analysis of disinfection methods.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo ma-shinostroeniya.: sb. tr. 8-y mezhd. nauch.- prakt. konf. [State and prospects for the development of agricultural machine building: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 605–608 (in Russian).

2. Logvinenko, D.D., Shelyakov, O.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem. [Process intensification in vortex-layer apparatus.] Kiev: Tekhnika, 1976, 144 p. (in Russian).

3. Vershinin, I.N., Vershinin, N.P. Apparaty s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem. [Apparatus with rotating electromagnetic field.] Salsk, 2007, 368 p. (in Russian).

4. Vershinin, N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov. Ispol'zovanie v promyshlennosti i v sel'skom khozyaystve. Ekologiya. [Process activation units. Application in industry and agriculture. Ecology.] Rostov-on-Don, 2004, 314 p. (in Russian).

5. Limarenko, N.V., et al. Issledovanie parametrov magnitnogo polya v rabochey kamere induktora. [Study on magnetic field parameters in the inductor working chamber.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 1, pp. 136–142 (in Russian).

6. Dreyner, N., Smit, G. Prikladnoy regressionnyy analiz. [Applied regression analysis.] Moscow: Statistika, 1973, 392 p. (in Russian).

7. Yevdokimov, Y.A., Kolesnikov, V.I., Teterin, A.I. Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. [Experimental design and analysis of experiments in solving problems of friction and wear.] Moscow: Nauka, 1980, 228 p. (in Russian).

8. Zedginidze, I.G. Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh system. [Experimental design to study multicomponent systems.] Moscow: Nauka, 1976, 390 p. (in Russian).

9. Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010, 326 p.

10. Adler, Y.P., Markova, E.V., Granovskiy, Y.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy. [Experimental design under searching for optimal conditions.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Nauka, 1976, 280 p. (in Russian).

11. Ventsel, E.S., Ovcharov, L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya. [Theory of random processes and its engineering applications.] 5th reimpression. Moscow: KNORUS, 2013, 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.06.2017
Сдана в редакцию 14.06.2017
Запланирована в номер 15.09.2017

Received 14.06.2017
Submitted 14.06.2017
Scheduled in the 15.09.2017

Месхи Бесарион Чохоевич,
заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды», (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ректор Донского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9347-3410
reception@donstu.ru

Meskhi, Besarion C.,
head of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Rector, Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9347-3410
reception@donstu.ru

Лимаренко Николай Владимирович,
аспирант, ассистент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Limarenko, Nikolay V.,
postgraduate student, teaching assistant of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Жаров Виктор Павлович,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X
zharovvp@mail.ru

Zharov, Victor P.,
professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X
zharovvp@mail.ru

Шаповал Борис Григорьевич,
доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5117-2262
nba-shapoval@yandex.ru

Shapoval, Boris G.,
associate professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand. Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5117-2262
nba-shapoval@yandex.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621.873.135:614.8:331.45 10.23947/1992-5980-2017-17-4-136-143

Обоснования безопасности грузоподъемных кранов*

А. А. Короткий[1], Е. В. Егельская [2], А. П. Шерстюк[3]**

[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Safety case: cargo cranes ***

A. A. Korotkiy[1], E. V. Yegelskaya[2], A. P. Sherstyuk[3]**

[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов в связи с изменениями законодательно-нормативной базы, допускающими компромиссные решения в случае отступления от требований промышленной безопасности.

Материалы и методы. Приведен пример обоснования безопасности при эксплуатации грузоподъемных кранов с учетом введения в действие федеральных норм и правил в части новых требований к зонам безопасности. Использованы материалы обследования объекта, эксплуатируемого с отступлениями от требований промышленной безопасности при работе козлового крана. Применен метод экспертной оценки частоты неблагоприятного события, позволяющий разработать рекомендации по уменьшению риска.

Результаты исследования. При обосновании безопасности опасного производственного объекта определены необходимые организационные и технические меры (барьеры безопасности), включающие сведения о технологических защитах, блокировках, системах автоматической защиты. Перечислены требования к квалификации персонала по организации безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты применимы на объектах, эксплуатирующих грузоподъемные краны, с целью снижения вероятности аварий и несчастных случаев. Обоснование безопасности дает четкое понимание и объективную оценку возможных рисков аварий и их последствий. С учетом полученных данных могут быть оптимизированы существующие условия работы, решены вопросы дальнейшей безопасной эксплуатации.

Introduction. Issues of ensuring safe operation of cranes due to changes in the legislative - regulatory system that allow for compromise solutions in case of deviations from the industrial safety requirements are considered.

Materials and Methods. An example of safety risks under the crane operation taking into account the enactment of the Federal regulations to the extent of new requirements for safety zones is given. Survey data of the site operated with deviations from the industrial safety requirements are used under operation of the frame crane. The method of expert evaluation of the adverse event frequency is applied. It makes possible to develop recommendations for risk reduction.

Research Results. In safety case of a hazardous industrial facility, reasonable safety management and engineering control (security barriers) are defined including data on the technological protection, blockings, and automatic protection systems. The employee qualification requirements for the safe operation of cranes are listed.

Discussion and Conclusions. The results obtained are applicable to the facilities that operate cranes in order to reduce the accident risks. The safety rationale provides a clear understanding and an objective assessment of the possible accident risks and their consequences. Taking into account the data obtained, the actual working conditions can be optimized, and the problems of further safe operation can be solved.

Ключевые слова: грузоподъемные краны, обоснование безопасности, оценка риска, компенсирующие мероприятия, барьеры безопасности, системы видеонаблюдения.

Keywords: cargo cranes, safety analysis, risk assessment, remedial measures, security barriers, CCTV systems.

Образец для цитирования: Короткий, А. А. Обоснования безопасности грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, Е. В. Егельская, А. П. Шерстюк // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 136–143.

For citation: A.A. Korotkiy, E.V. Yegelskaya, A.P. Sherstyuk. Safety case: cargo cranes. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 136–143.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: korot@novoch.ru, egelskaya72@mail.ru, tolik.sherstyuk@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Главные особенности аварий на опасных производственных объектах (ОПО), где эксплуатируются грузоподъемные краны, — сравнительная редкость инцидентов (с учетом жизненного цикла производства) и значительный разброс масштабов последствий.

При этом очевидно, что вполне могут быть исключены или минимизированы организационные и технические факторы, являющиеся предпосылками возникновения аварий и травмирований (несчастных случаев) при эксплуатации грузоподъемных кранов на ОПО.

Следует отметить, что работа на некоторых объектах регулируется различными нормативами, которые могут противоречить друг другу в части обеспечения безопасности. Долгое время оставался открытым вопрос о возможности эксплуатации кранов на таких объектах.

В настоящее время законодательством в области промышленной безопасности [1] определено требование о разработке «Обоснования безопасности опасного производственного объекта» в случаях, если при эксплуатации, капитальном ремонте, консервации и ликвидации ОПО требуется отступление от требований промышленной безопасности, установленных федеральными нормами и правилами. Наличие такого обоснования призвано разрешить конфликты между надзорными органами и эксплуатирующими организациями.

В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов на примере объекта, эксплуатирующего козловые краны с отступлениями от требований промышленной безопасности, а также предлагается применение метода экспертной оценки частоты неблагоприятного события, позволяющего разработать рекомендации по уменьшению риска.

Основная часть. Вопросы оценки риска при эксплуатации ОПО в России широко обсуждаются, что отражено в публикациях известных в области рискологии российских ученых [2, 3, 4, 5, 6]. В данном случае подразумевается общепринятое представление о риске как о вероятном неблагоприятном событии и последствии — таком, как потеря, ущерб, убыток. Перспективы использования методов оценки риска обсуждались в органах исполнительной власти. В итоге решением Коллегии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору утверждена «Концепция совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020 года» [7]. Руководящим принципом данной концепции является риск-ориентированный подход к обеспечению безопасной эксплуатации ОПО. Федеральные нормы и правила (ФНП) в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта» [8] устанавливают необходимость оценки риска, предусматривающей анализ сценариев возможных событий — вероятных и маловероятных (неблагоприятных). При этом в обязательном порядке должны быть выявлены условия и оценена вероятность реализации сценариев аварий и травмирования (причинения вреда жизни и здоровью) обслуживающего персонала.

Для объектов, эксплуатирующих грузоподъемные краны, отсутствует статистика редких факторов с тяжелым (крупным) ущербом, поэтому трудно прогнозировать вероятность неблагоприятного события и ожидаемый ущерб. С другой стороны, при работе грузоподъемного крана вероятно возникновение производственной аварии, вследствие которой возможно полное или частичное прекращение выпуска продукции, оказание услуг, разрушение технических объектов, повреждение здоровья и гибель людей. Таким образом, возможна опасная производственная ситуация, т. е. совокупность обстоятельств и событий, нарушающих штатное (проектное) течение технологических процессов и создающих неуправляемую концентрацию и нарастание опасностей, угрожающих техническим системам, окружающей природной среде, жизни и здоровью людей.

Со временем границы безопасности могут быть пересмотрены, поскольку изменяются факторы, влияющие на выбор приемлемого риска. Особое значение и актуальность приобретает управление рисками (или менеджмент рисков) — выработка и реализация управленческих решений, обеспечивающих минимизацию или исключение потерь при выполнении работ в рамках того или иного проекта. В частности, менеджмент рисков может заранее оценить и снизить возможные негативные последствия при эксплуатации технических устройств.

Ранее в работе [9] были выявлены основные факторы, влияющие на степень риска грузоподъемных кранов, а именно:

— изношенность находящегося в эксплуатации оборудования;

— неисправность и принудительное выведение из строя приборов и устройств безопасности;

— отсутствие технологических регламентов на конкретные виды работ;

— низкий уровень организационных мероприятий, проводимых инженерно-техническими специалистами при непосредственном руководстве работами;

— допуск к работам неквалифицированного персонала и др.

Также было статистически подтверждено, что аварийность и травматизм в большинстве случаев (90 %) обусловлены человеческим фактором, т. е. низким уровнем профессиональной подготовки персонала, принятием ошибочных решений исполнителями, незнанием требований нормативно-технических документов.

Анализ вероятности риска при работе грузоподъемных кранов. При функционировании грузоподъемного крана возникает ряд факторов, сопряженных с рисками. Анализ таких рисков предполагает выполнение следующих процедур:

— обоснование приемлемого риска;
— идентификация опасностей;
— оценка риска с анализом неопределенности и точности результатов;
— разработка рекомендаций по уменьшению риска;
— управление риском.

Перечисленные мероприятия проводятся в соответствии с имеющейся нормативно-правовой документацией или с учетом статистических данных об авариях (несчастных случаях). При оценке потенциальных рисков анализируются различные сценарии типичных, вероятных, а также маловероятных событий, выявляются условия и оценивается вероятность их реализации. Наиболее доступным является известный метод экспертной оценки частоты неблагоприятного события [9], позволяющий разработать рекомендации по снижению вероятности риска.

Базой для оценки риска служит процедура идентификации, основанная на следующей информации:

— класс опасности производственной среды,
— работа подобных технических систем,
— статистика отказов грузоподъемных кранов и ошибок персонала,
— данные о несчастных случаях и пр.

При идентификации рекомендуется рассматривать три группы опасностей, обусловленных тремя факторами:

1) ошибочные действия персонала,
2) состояние грузоподъемного крана,
3) класс опасности производственной среды.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация реализации возможного неблагоприятного события (аварии, инцидента, несчастного случая), на которой вероятности опасностей $P1(t)$, $P2(t)$, $P3(t)$ изображены в виде окружностей в поле возможных реализаций.

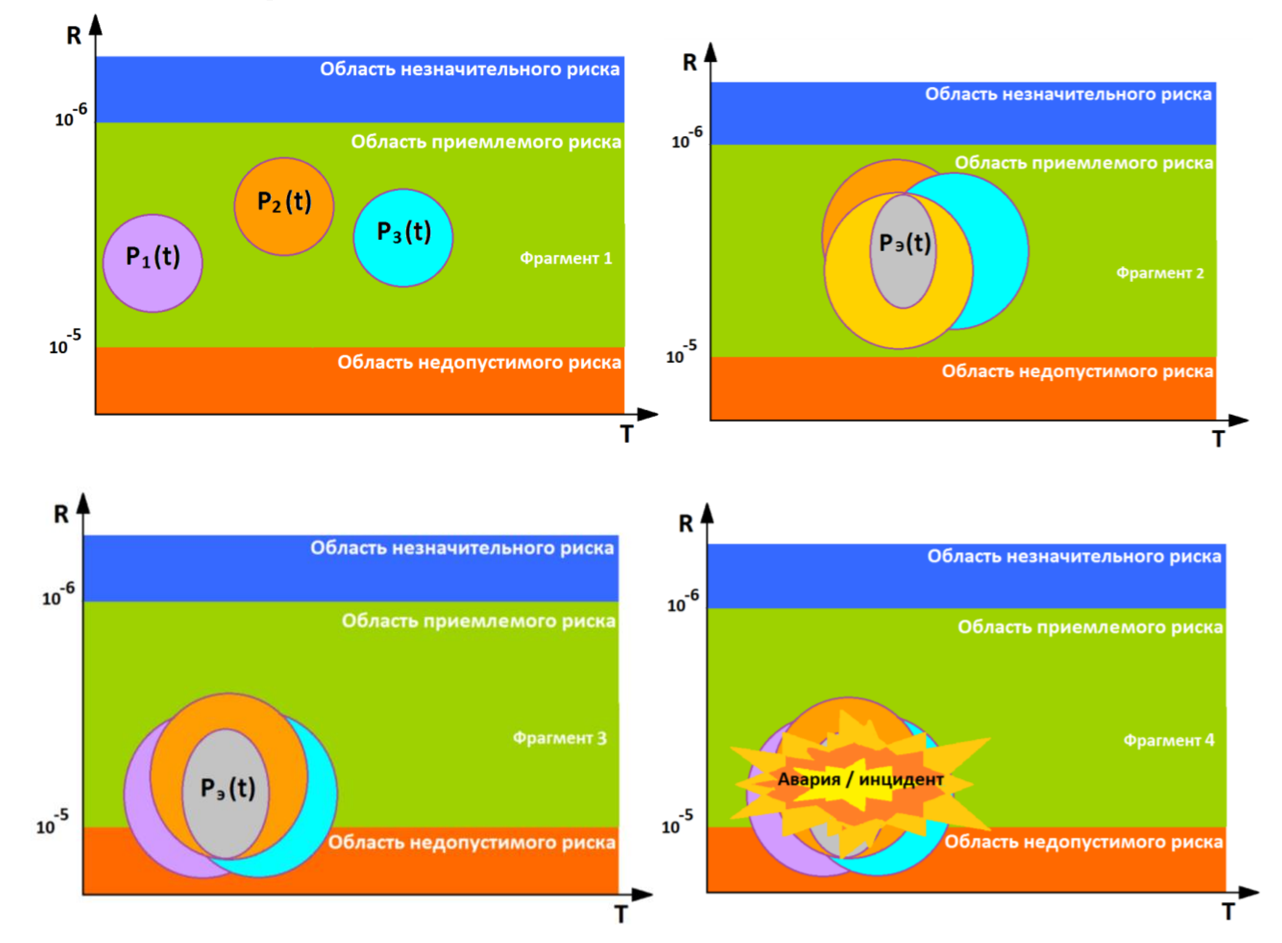


Рис. 1. Фрагменты процесса возникновения и развития неблагоприятного события (аварии, инцидента, несчастного случая): риск R во времени T

Fig. 1. Fragments of occurrence and development of adverse event (emergency, incident, accident): risk R in time T

Поле возможных реализаций опасностей с учетом частоты реализации неблагоприятного события статистически разделено на три области:

— область незначительного риска $R_u^i > 10^{-6}$;

— область приемлемого риска $10^{-5} \leq R_u^i < 10^{-6}$;

— область недопустимого риска $R_u^i < 10^{-5}$ [9].

В результате идентификации могут быть четко описаны все опасности, связанные с работой грузоподъемного крана, установленного на конкретном объекте. Данные о возможной реализации неблагоприятного события послужат основой для разработки компенсирующих мероприятий.

Обоснование безопасности грузоподъемных кранов в типичных условиях эксплуатации. В качестве примера рассмотрим объект, на котором эксплуатируется козловой кран, перемещающийся по наземному рельсовому пути. Это характерные условия, с которыми сталкиваются эксплуатирующие организации. При обеспечении безопасности они обязаны в первую очередь соблюдать установленные нормативы удаленности частей (элементов) крана от зданий и сооружений [10].

Натурные обследования объекта могут зафиксировать несоблюдение достаточного расстояния между выступающими частями крана, передвигающегося по наземному крановому пути, и строениями. Кроме того, может быть отмечена вероятность нахождения людей в потенциально опасных зонах между частями крана и сооружениями, предметами, оборудованием.

Для обоснования необходимости и достаточности принятых мер, компенсирующих такие отступления, разрабатываются специальные технические и организационные мероприятия.

В качестве технических мероприятий могут быть предложены установка барьеров безопасности, внедрение блокировки прохода и систем видеонаблюдения. На рис. 2 представлены варианты барьеров безопасности.





Рис. 2. Барьеры безопасности в виде металлических ограждений

Fig. 2. Security barriers in the form of metallic enclosures

На рис. 3 показано, как может быть обеспечена блокировка прохода в виде концевого выключателя.



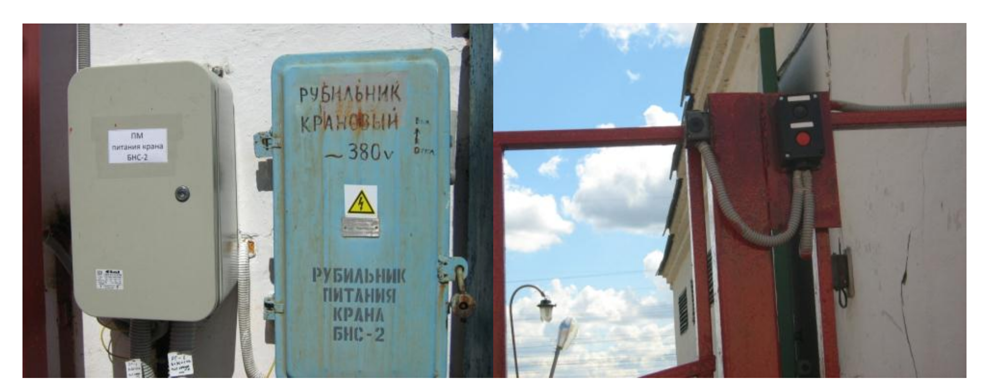


Рис. 3. Блокировка прохода в виде концевого выключателя

Fig. 3. Passage blocking in the form of end switch

Блокировки в виде концевых выключателей на калитках металлических ограждений могут быть использованы для устранения несанкционированного доступа в огражденное пространство. При этом в схему электрического питания козлового крана устанавливается магнитный пускатель.

На рис. 4 показаны возможные места установки видеокамер и мониторов.

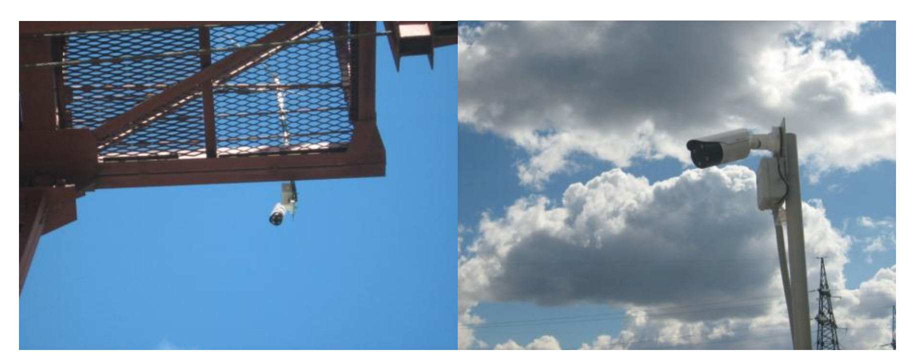




Рис. 4. Места установки видеокамер и мониторов

Fig. 4. Video cameras and monitors sites

Система видеонаблюдения позволяет крановщику контролировать потенциально опасные для людей зоны работы оборудования. В данном случае две камеры видеонаблюдения устанавливаются на неподвижных металлических стойках и на пролетном строении козлового крана.

Обоснование безопасности предполагает ряд организационных мероприятий. В частности, предлагается дополнить новыми требованиями должностные инструкции специалистов, производственные инструкции обслуживающего и ремонтного персонала, а также руководства по эксплуатации оборудования.

Должностные инструкции специалистов могут быть дополнены следующими требованиями: «Контролировать правильность использования и применения системы видеонаблюдения за подкрановыми путями при производстве работ. Не допускать краны к работе при неисправной системе видеонаблюдения».

Производственная инструкция машиниста крана может быть дополнена следующими требованиями: «При пуске козлового крана крановщик должен пройти в калитку, снять кран с противоугонного устройства (захвата), включить главный рубильник электропитания крана и закрыть дверцу калитки. Далее следует подняться на кран, вставить ключ-марку, включить аварийный рубильник, нажать кнопку включения защитной панели и опробовать работоспособность оборудования. Перед началом и во время работы козлового крана крановщик с помощью монитора, установленного в кабине, должен контролировать подкрановые пути, чтобы убедиться в отсутствии людей в потенциально опасной зоне».

Организационные и технические мероприятия, разработанные с целью обоснования безопасности, должны пройти независимую экспертизу. Положительное заключение экспертизы промышленной безопасности (ЗЭПБ) регистрируется в территориальном органе Ростехнадзора, где эксплуатируется козловой кран. Только после регистрации ЗЭПБ кран может быть допущен к эксплуатации.

В феврале 2017 года в статью 3 федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» внесены изменения. Теперь организация, выдавшая положительное заключение, несет имущественную ответственность за вред, причиненный в процессе работы согласно данному ЗЭПБ.

Заключение. В работе рассмотрен объект, эксплуатирующий козловые краны с отступлениями от требований промышленной безопасности. Для снижения риска возникновения аварийных ситуаций предложено применение метода экспертной оценки частоты неблагоприятного события. При обосновании безопасности опасного производственного объекта определены необходимые организационные и технические меры (барьеры безопасности), включающие сведения о технологических защитах, блокировках, системах автоматической защиты. Перечислены дополнительные требования к квалификации персонала по организации безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.

Результаты представленного исследования могут быть использованы на производственных объектах, эксплуатирующих грузоподъемные краны, с целью снижения или исключения вероятности возникновения аварий и несчастных случаев. Обоснование безопасности дает четкое понимание и объективную оценку возможных рисков аварий и их последствий. С учетом полученных данных могут быть оптимизированы существующие условия работы, а также решены вопросы дальнейшей безопасной эксплуатации.

Библиографический список

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон : [утв. Президентом Российской Федерации 21 июля 1997 г. (ред. от 07.03.2017 г.)]. — Москва : Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2017. — 56 с.

2. Короткий, А. А. Методологические основы оценки, прогнозирования и управления промышленной безопасностью подъемных сооружений : автореф. дис. … д-ра техн. наук / А. А. Короткий. — Новочеркасск, 1997. — 37 с.

3. Котельников, В. С. Методы диагностики и риск-анализа металлоконструкций грузоподъемных машин в управлении их безопасностью : автореф. дис. … д-ра техн. наук / В. С. Котельников. — Новочеркасск, 2006. — 39 с.

4. Анализ риска и его нормативное обеспечение / В. Ю. Мартынюк [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 1995. — № 11. — С. 55–62.

5. Кузьмин, И. И. Безопасность и риск. Эколого-экономические аспекты / И. И. Кузьмин, Н. А. Махутов, С. В. Хетагуров. — Санкт-Петербург : СПГУЭФ, 1997. — 164 с.

6. Гражданкин, А. И. К риск-ориентированной промбезопасности / А. И. Гражданкин // Контроль качества продукции. — 2012. — № 7. — С. 18–23.

7. Концепция совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020 года : [утв. решением Коллегии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26 сентября 2011 г.] [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=535787#0 (дата обращения: 01.06.17).

8. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта : федер. нормы и правила в области промышленной безопасности : [утв. Приказом Ростехнадзора № 306 от 15 июля 2013 г.] [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_151251/ (дата обращения 08.06.17).

9. Егельская, Е. В. Оценка риска человеческого фактора в системе «персонал — подъемные механизмы — производственная среда» на предприятиях машиностроения : автореф. дис. … канд. техн. наук / Е. В. Егельская. — Ростов-на-Дону, 2015. — 20 с.

10. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения : федер. нормы и правила в области промышленной безопасности : [утв. Приказом Ростехнадзора № 533 от 12 ноября 2013 г. (в ред. с изм. на 12.04.2016 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157709/ (дата обращения 08.06.17).

References

1. O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov : feder. zakon: [utv. Prezidentom Rossiyskoy Federatsii 21 iyulya 1997 g. (red. ot 07.03.2017 g.)]. [On industrial safety of hazardous production facilities: Feder. law: [approved by President of the Russian Federation on July 21, 1997 (as amended on 07/03/2017)] Moscow: Research and Development Centre on Industrial Safety Problems, 2017, 56 p. (in Russian).

2. Korotkiy, A.A. Metodologicheskie osnovy otsenki, prognozirovaniya i upravleniya promyshlennoy bezopasnost'yu pod"emnykh sooruzheniy: avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk. [Methodological background for assessment, forecasting and management of industrial safety of lifting structures: Dr.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] Novocherkassk, 1997, 37 p. (in Russian).

3. Kotelnikov, V.S. Metody diagnostiki i risk-analiza metallokonstruktsiy gruzopod"emnykh mashin v upravlenii ikh bezopasnost'yu: avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk. [Methods of diagnostics and risk-analysis of metal structures of load-lifting machines in their safety control: Dr.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] Novocherkassk, 2006, 39 p. (in Russian).

4. Martynyuk, V.Y., et al. Analiz riska i ego normativnoe obespechenie. [Risk analysis and its regulatory support.] Occupational Safety in Industry, 1995, no. 11, pp. 55–62 (in Russian).

5. Kuzmin, I.I., Makhutov, N.A., Khetagurov, S.V. Bezopasnost' i risk. Ekologo-ekonomicheskie aspekty. [Safety and risk. Eco-economic aspects.] St.Petersburg: SPGUEF, 1997, 164 p. (in Russian).

6. Grazhdankin, A.I. K risk-orientirovannoy prombezopasnosti. [To risk-oriented industrial safety.] Production Quality Control, 2012, no. 7, pp. 18–23 (in Russian).

7. Kontseptsiya sovershenstvovaniya gosudarstvennoy politiki v oblasti obespecheniya promyshlennoy bezopasnosti s uchetom neobkhodimosti stimu-lirovaniya innovatsionnoy deyatel'nosti predpriyatiy na period do 2020 goda : [utv. resheniem Kollegii Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 26 sentyabrya 2011 g.] [Concept of improving state policy in the field of ensuring industrial safety with account for need to stimulate innovative activity of enterprises for the period up to 2020: [approved by decision of Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Oversight Body of September 26, 2011.] Available at: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=535787#0 (accessed: 01.06.17) (in Russian).

8. Obshchie trebovaniya k obosnovaniyu bezopasnosti opasnogo proizvodstvennogo ob"ekta: feder. normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti : [utv. Prikazom Rostekhnadzora № 306 ot 15 iyulya 2013 g.] [General requirements for safety case of hazardous production facility: Federal regulations on industrial safety: [approved by Order of Rostekhnadzor No. 306 of July 15, 2013.] Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_151251/ (accessed: 08.06.17) (in Russian).

9. Yegelskaya, E.V. Otsenka riska chelovecheskogo faktora v sisteme «personal — pod"emnye mekhanizmy — proizvodstvennaya sreda» na predpriyatiyakh mashinostroeniya: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. [Assessment of human factor risk in the system of “personnel — lifting mechanisms — production environment” at enterprises of mechanical engineering: Cand.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] Ростов-на-Дону, 2015. — 20 с. (in Russian).

10. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения: федер. нормы и правила в области промышленной безопасности : [утв. Приказом Ростехнадзора № 533 от 12 ноября 2013 г. (в ред. с изм. на 12.04.2016 г.) [Safety rules for hazardous production facilities on which lifting facilities are used: Federal regulations on industrial safety: [approved by Order of Rostekhnadzor No. 533 of November 12, 2013 (as amended on April 12, 2016).] Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157709/ (accessed: 08.06.17) (in Russian).

Поступила в редакцию 20.07.2017
Сдана в редакцию 28.07.2017
Запланирована в номер 15.09.2017

Received 20.07.2017
Submitted 28.07.2017
Scheduled in the issue 15.09.2017

Об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9446-4911
korot@novoch.ru

Егельская Елена Владимировна,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3864-9254
egelskaya72@mail.ru

Шерстюк Анатолий Петрович,
магистрант кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4311-8207
tolik.scherstyuk@mail.ru

Authors:

Korotkiy, Anatoly A.,
head of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9446-4911
korot@novoch.ru

Yegelskaya, Elena V.,
associate professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3864-9254
egelskaya72@mail.ru

Sherstyuk, Anatoly P.,
Master of Sci. of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4311-8207
tolik.scherstyuk@mail.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 551.509.328 10.23947/1992-5980-2017-17-4-144-150

Прогнозирование уровня загрязнения воздуха городской среды экспертным путем*

Е. О. Лазарева[1], И. Н. Липовицкая[2], Е. С. Андреева[3], Ю. В. Ефимова[4]**

[1] Санкт-Петербургская метеостанция, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский институт гуманитарного образования, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4] Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Forecast of urban air pollution level by expertise***

E. O. Lazareva[1], I. N. Lipovitskaya[2], E. S. Andreeva[3], Y. V. Yefimova[4]**

[1] Weather station, St. Petersburg, Russian Federation
[2] Saint-Petersburg Institute of Education in the Sphere of Humanities and Social Sciences, St. Petersburg, Russian Federation
[3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4] Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation

Введение. Для г. Санкт-Петербурга характерен климат с морскими чертами. Отмеченная в последнее десятилетие неустойчивость погодно-климатических условий обусловила актуальность данной работы, цель которой — построение схем для определения ожидаемого уровня загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга по методу «дерево принятия решения».

Материалы и методы. Изучены и обработаны срочные данные метеорологических наблюдений, выполненных на станции 26063 (г. Санкт-Петербург) с 2006 по 2014 гг. В рамках исследования рассмотрены данные по вертикальному профилю атмосферы, получаемые путем радиозондирования атмосферы г. Санкт-Петербурга в 00.00 и 12.00 UTC (Всемирного скоординированного времени) на станции Воейково.

Результаты исследования. В ходе работы была установлена зависимость формирования уровня загрязнения атмосферного воздуха от синоптического процесса и инерционного фактора, что позволило сформировать схемы прогноза уровня загрязнения воздуха в виде «дерева принятия решения» экспертным путем.

Оправдываемость прогностического определения ожидаемой группы загрязнения атмосферного воздуха по Санкт-Петербургу была рассчитана на зависимом материале и составила для холодного периода года 90 % (ночные часы) и 91 % (дневные часы); для теплого периода года — 84 % (ночные часы) и 87 % (дневные часы). Это говорит о том, что предлагаемые схемы позволяют получить более эффективный прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха в холодный период года.

Обсуждение и заключения. В заключении сформулированы выводы и перечислены основные результаты.

— Сформированы архивы исходных стандартных метеорологических данных и данных радиозондирования атмосферы, а также синоптических положений и сведений об уровне загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга за период

Introduction. A climate pattern with marine features is typical for St. Petersburg. Vagaries of weather and climate conditions in the last decade specify the timeliness of this work, the purpose of which is to outline the expected level of the open air pollution in St. Petersburg by the “decision tree” method.

Materials and Methods. Current data of weather observations carried out at station 26063 (St. Petersburg) from 2006 to 2014 are studied and processed. Within the framework of the study, the data were considered on the vertical profile of the atmosphere obtained through radiosounding the atmosphere of St. Petersburg at 00.00 and 12.00 UTC (Universal Time Coordinated) at Voeykovo station.

Research Results. In the course of the investigation, the dependence of the atmospheric air pollution level on the synoptic process and the inertial factor was established which made it possible to figure a scheme for forecasting the air pollution level in the form of the decision tree by expertise. Accuracy of the predictive determination of the expected air pollution group in St. Petersburg was calculated on the dependent material and topped 90% (nighttime hours) and 91% (daytime hours) for a cold period; and – 84% (nighttime hours) and 87% (daylight hours) for a warm period of the year. This suggests that the proposed schemes allow obtaining a more efficient prediction of the atmospheric air pollution level in a cold period of the year.

Discussion and Conclusions. In conclusion, basic outcomes and inferences are summarized.

— Archives of baseline standard meteorological data and data of the atmosphere radiosounding, as well as synoptic situations and information on the level of atmospheric air pollution in St. Peters-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: milyutina.e.o@yandex.ru, lipovitskaya@mail.ru, esameteo@mail.ru, uluef@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

с 2006 по 2014 гг.
— Установлены группы синоптических процессов, характерные для Санкт-Петербурга с 2006 по 2014 гг.
— Разработаны схемы прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха по методу «дерево принятия решения» с оправдываемостью 84–91 %.
Результаты работы применимы для прогноза уровня загрязнения городского воздуха.

burg for the period from 2006 to 2014, are formed.
— Groups of synoptic processes typical for St. Petersburg from 2006 to 2014 are established.
— Schemes for forecasting the atmospheric air pollution level are developed using the “decision tree” method with accuracy of 84-91%.
The research results are applicable for forecasting the urban air pollution level.

Ключевые слова: безопасность жизнедеятельности, метеорологические характеристики, характеристики загрязненности атмосферы, синоптический процесс, параметр *P*, прогноз загрязнения атмосферного воздуха, дерево принятия решения, статистический анализ, физический анализ.

Keywords: health safety, meteorological characteristics, air impurity characteristics, synoptic process, *P* parameter, forecast of atmospheric air pollution, “decision tree” method, statistical analysis, physical analysis, St. Petersburg.

Образец для цитирования: Лазарева, Е. О. Прогнозирование уровня загрязнения воздуха городской среды экспертным путем / Е. О. Лазарева [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17 № 4. — С. 144–150.

For citation: E.O. Lazareva, I.N. Lipovitskaya, E.S. Andreeva, Y.V. Yefimova. Forecast of urban air pollution level by expertise. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 144–150.

Введение. Качество атмосферного воздуха является необходимым условием обеспечения безопасности жизнедеятельности населения. Проблему загрязнения атмосферного воздуха относят к числу приоритетных геоэкологических проблем современного мира [1].

История исследований указанных проблем насчитывает около 60 лет. За это время были решены некоторые теоретические и практические задачи [2, 3, 4, 5, 6]. В частности, установлено, что на уровень загрязнения атмосферного воздуха существенно влияют синоптические ситуации и характерные для них метеорологические условия [4]. Для г. Санкт-Петербурга характерен климат с морскими чертами. Отмеченная в последнее десятилетие неустойчивость погодно-климатических условий обусловила актуальность данной работы, цель которой — построение схем для определения ожидаемого уровня загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга по методу «дерево принятия решения».

Для достижения цели решены следующие задачи:
— создание баз данных для последующих статистического и физического анализов;
— установление повторяемости характерных групп синоптических процессов в условиях Санкт-Петербурга с учетом ситуаций последнего десятилетия;
— выполнение расчетов и выработка схем прогноза ожидаемого уровня загрязнения атмосферного воздуха.

Материалы и методы. Изучены и обработаны срочные данные метеорологических наблюдений, выполненных на станции 26063 (г. Санкт-Петербург) с 2006 по 2014 гг. [7]. В рамках исследования рассмотрены данные по вертикальному профилю атмосферы, получаемые путем радиозондирования атмосферы г. Санкт-Петербурга в 00.00 и 12.00 UTC (Всемирного скоординированного времени) на станции Воейково.

Результаты исследования. Авторами представленной работы был выполнен анализ архивного материала 3279 приземных карт погоды над Европой из базы данных [8] за период с 2006 по 2014 гг. (ежесуточно в 00.00 UTC). В результате авторы получили возможность:
— посуточно охарактеризовать синоптическую обстановку в исследуемом районе;
— указать периферию или часть барического образования, которая определяет погодные условия в районе Санкт-Петербурга.

В ходе исследования были выделены следующие синоптические объекты за период с 2006 по 2014 гг.: атлантический циклон, ныряющий циклон, южный циклон, арктический антициклон, отрог Сибирского антициклона, отрог Азорского антициклона (рис. 1).

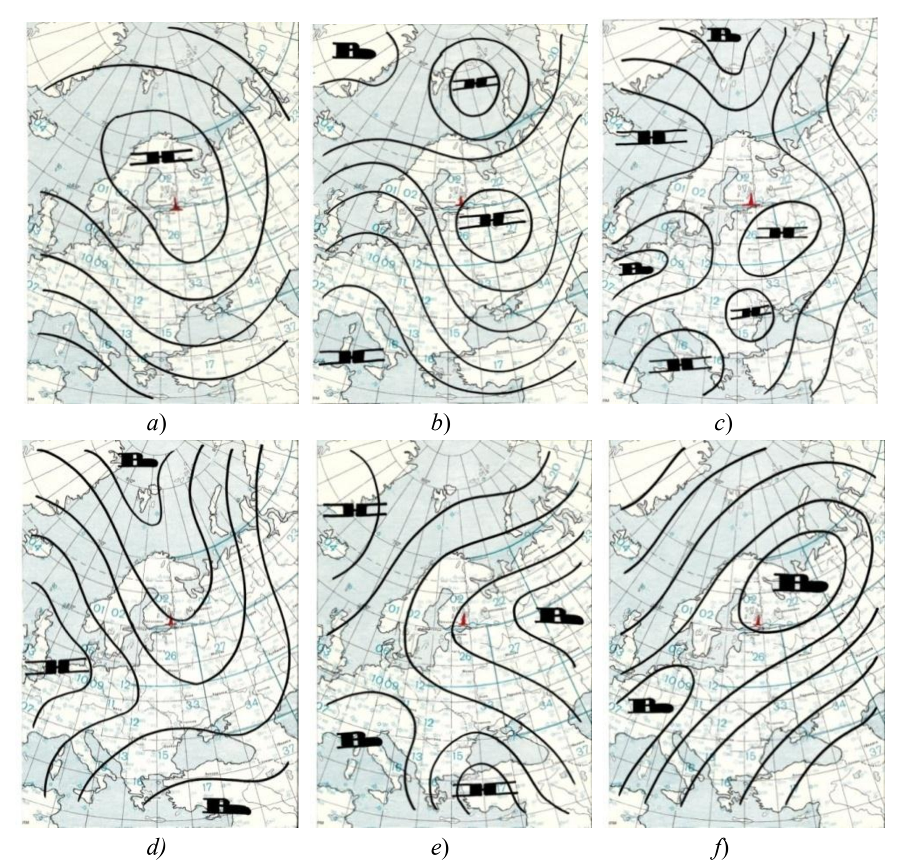


Рис. 1. Типовые синоптические процессы: атлантический циклон (*a*), ныряющий циклон (*b*), южный циклон (*c*), арктический антициклон (*d*), отрог Сибирского антициклона (*e*), отрог Азорского антициклона (*f*)

Fig. 1. Typical synoptic processes: Atlantic cyclone (a), diving cyclone (b), southern cyclone (c), Arctic anticyclone (d), Siberian anticyclone extension (e), Azores anticyclone extension (f)

Характерные группы синоптических процессов последнего десятилетия выделены с учетом географического происхождения барических образований, траектории их движения. При этом анализ холодного и теплого периодов года позволил уточнить повторяемость синоптических процессов для полугодий (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Повторяемость характерных групп синоптических процессов для холодного и теплого сезонов года с 2006 по 2014 гг.

Frequency of specific groups of synoptic processes for cold and warm periods from 2006 to 2014

Группа синоптического процесса	Повторяемость, %, для периодов	
	холодного	теплого
Атлантический циклон	48	43
Ныряющий циклон	8	–
Южный циклон	9	18
Арктический антициклон	21	14
Отрог Сибирского антициклона	14	–
Отрог Азорского антициклона	–	25

Были рассмотрены данные наблюдений за состоянием атмосферного воздуха города за 2006–2014 гг., представленные ФГБУ «Северо-западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Наблюдения производились на 10 стационарных постах Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных в 8 административных районах города, 4 раза в сутки (в 01.00; 07.00; 13.00; 19.00), согласно полной программе наблюдений на метеорологических постах, изложенной в РД 52.04.186-89. Были отмечены:

— общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах (n);

— количество наблюдений (m) в течение этого же дня с концентрациями (q), превышающими более чем в 1,5 раза ($q > 1{,}5\ q_{ср}$) среднесезонное значение $q_{ср}$ по двум примесям: оксиду углерода и диоксиду азота, которые являются про-

дуктами неполного сгорания топлива в двигателях автотранспортных средств и вносят наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха города [9].

Перечисленные выше данные позволили рассчитать фактическое значение интегрального показателя P загрязнения воздуха в городе в отношении совокупности примесей [10]:

$$P = m/n, \tag{1}$$

где n — общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах; m — количество наблюдений в течение этого же дня с концентрациями (q), которые превышают среднесезонное значение $q_{ср}$ более чем в 1,5 раза ($q > 1{,}5q_{ср}$).

В соответствии с РД 52.04.306-92 [10] при применении параметра P рассматривались следующие три группы загрязнения воздуха: $P > 0{,}35$ — относительно высокое (первая группа); $0{,}20 < P \leq 0{,}35$ — повышенное (вторая группа); $P \leq 0{,}20$ — пониженное (третья группа) [11].

С целью детальной оценки вклада характерных синоптических процессов в загрязнение атмосферного воздуха Санкт-Петербурга сформированы массивы данных для холодного и теплого периодов года (согласно годовому ходу температуры воздуха и радиационного баланса). Таким образом, рассматривались периоды с ноября по март (1050 дней) и с апреля по октябрь (1587 дней). Отдельно анализировались дневные (09.00–21.00) и ночные (21.00–09.00) случаи и учитывались три группы загрязнения по параметру P.

Анализ массива сформированных данных выполнялся в несколько этапов:

— рассматривался суточный ход загрязнения;
— выявлялся вклад синоптического процесса в формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха;
— оценивалась вероятность загрязнения при различных группах синоптических процессов;
— проводился регрессионный анализ;
— рассчитывались коэффициенты взаимной сопряженности между уровнем загрязнения воздуха и характерным синоптическим процессом [12].

Коэффициент взаимной сопряженности Пирсона и Чупрова (формулы 2–5) [13] применялся для оценки связи между тем или иным синоптическим процессом и уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Таким образом, в работе был выполнен расчет коэффициентов Пирсона и Чупрова для ночных, дневных часов и за сутки:

$$Kп = \sqrt{\frac{\varphi^2}{1+\varphi^2}} \tag{2}$$

$$Kч = \sqrt{\frac{\varphi^2}{\sqrt{(\kappa 1-1)(\kappa 2-1)}}} \tag{3}$$

где Кп — коэффициент Пирсона; Кч — коэффициент Чупрова; φ^2 — коэффициент взаимной сопряженности; $k1$ — число групп загрязнений; $k2$ — число групп синоптических ситуаций.

С помощью критерия согласия χ^2 была осуществлена проверка гипотезы о виде распределения [13]:

$$\chi^2 = f\left\{\sum{}_{xy} \frac{f_{xy}^2}{f_x f_y} - 1\right\}, \tag{4}$$

где f^2 — показатель взаимной сопряженности; f — количество случаев по выборке для каждой группы; x — суммарное количество случаев по группам загрязнения; y — суммарное количество случаев по группам синоптических ситуаций.

При оценке по критерию χ^2 (для всех рассматриваемых случаев $\chi^2 > \chi^2_{кр}$) были определены статистически значимые различия, позволяющие выявить связь между синоптическими процессами и уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

При пошаговом проведении регрессионного анализа методом включения для ночных часов было выявлено существенное влияние инерционных факторов как предикторов в 39 % случаев за холодный период и в 38 % — за теплый. Это позволяет сделать вывод о ведущей роли инерционного фактора при прогнозировании уровня загрязнения атмосферного воздуха [13].

Таким образом, была установлена зависимость формирования уровня загрязнения атмосферного воздуха от синоптического процесса и инерционного фактора. Это позволило сформировать схемы прогноза уровня загрязнения воздуха экспертным путем по методу «дерево принятия решения». Данный метод иллюстрирует вклад инерционной составляющей в формирование уровня загрязнения воздушной среды города, а также вклад синоптических процессов.

Итак, для выделения прогнозируемой группы загрязнения воздуха, учитывая параметр P, необходимо:

— заблаговременно, за сутки, учесть возможность прогнозируемого синоптического процесса (например, воспользоваться прогнозом Гидрометцентра);
— сопоставить значение параметра *P* и синоптический процесс в текущий момент времени, с учетом того, что относительно определяемого значения это предыдущий срок.

Для определения прогнозируемой группы загрязнения в первую очередь рекомендуется выбрать в «дереве» синоптический процесс, который необходимо прогнозировать, затем выделить группу загрязнения воздуха города в текущий момент и, возможно, текущий синоптический процесс. Все перечисленное выше позволяет в итоге адекватно выявить прогнозируемую группу загрязнения воздуха.

Оправдываемость прогностического определения ожидаемой группы загрязнения атмосферного воздуха по Санкт-Петербургу была рассчитана на зависимом материале и составила для холодного периода года 90 % (ночные часы) и 91 % (дневные часы); для теплого периода года — 84 % (ночные часы) и 87 % (дневные часы). Это говорит о более эффективном прогнозе уровня загрязнения атмосферного воздуха по предлагаемым схемам в холодный период года.

Способ прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха по методу «дерево принятия решения» является принципиально новым. Эта практика может быть использована в работе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации. Отметим достоинства предлагаемого способа. Простота и доступность исходных данных позволяют минимизировать трудозатраты, сохранив при этом оправдываемость на достаточно высоком уровне. Кроме того, с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности населения [14] можно предложить разработку подобных схем и для других городов. В настоящее время авторы разрабатывают методические рекомендации по внедрению данного метода в практику работы региональных органов Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Обсуждение и заключения. Проведенные научные изыскания позволили получить следующие результаты.

— Сформированы архивы исходных стандартных метеорологических данных и данных радиозондирования атмосферы, а также синоптических положений и сведений об уровне загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга за период с 2006 по 2014 гг.

— Установлены группы синоптических процессов, характерные для Санкт-Петербурга с 2006 по 2014 гг.

— Разработаны схемы прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха по методу «дерево принятия решения» с оправдываемостью 84–91 %.

Результаты работы применимы для прогноза уровня загрязнения городского воздуха.

Библиографический список

1. Morrison, J. Sustainable development / J. Morrison. — London : Profile Books, 2002. — 370 p.

2. Безуглая, Э. Ю. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / Э. Ю. Безуглая. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1983. — 328 с.

3. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1975. — 448 с.

4. Сонькин, Л. Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы / Л. Р. Сонькин. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1991. — 223 с

5. Boettger, C.-M. Air-pollution potential East of the Rocky Mountains — Fall 1959 / C.-M. Boettger // Bulletin of the American Meteorological Society. — 1961. — Vol. 42. — P. 615–620.

6. Boettger, C.-M. The Nashville daily air pollution forecast / C.-M. Boettger, H.-J. Smitth // Monthly Weather Review. — 1961. — Vol. 89, № 11. — P. 477–481.

7. Архив погоды в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] / ООО «Расписание погоды» // rp5.ru. — Режим доступа: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге (дата обращения 03.11.17).

8. Карты погоды [Электронный ресурс] / Meteoweb.ru. — Режим доступа: http://meteoweb.ru/ (дата обращения 03.11.17).

9. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в 2014 году / Под ред. И. А. Серебрицкого. — Санкт-Петербург : Сезам-принт, 2015. — 404 с.

10. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. РД 52.04.306-92 / Комитет гидрометеорологии СССР. — Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1993. — 104 с.

11. Лазарева, Е. О. Влияние температурных инверсий на концентрацию примесей в приземном слое воздуха над Санкт-Петербургом в 2006–2014 гг. / Е. О. Лазарева, Е. С. Попова, И. Н. Липовицкая // Ученые записки РГГМУ. — 2015. — № 41. — С. 149–155.

12. Лазарева, Е. О. Схема уточнения к модели прогнозирования рассеивания антропогенных примесей атмосферного воздуха для г. Санкт-Петербург / Е. О. Лазарева // Естественные и технические науки. — 2016. — № 3. — С. 104–108.

13. Лазарева, Е. О. Загрязнение атмосферного воздуха г. Санкт-Петербург при различных синоптических ситуациях : автореф. дис. … канд. геогр. наук / Е. О. Лазарева. — Санкт-Петербург, 2016. — 144 с.

14. Евстропов, В. М. Системные аспекты взаимодействия объектов и среды в техносферном пространстве / В. М. Евстропов. — Ростов-на-Дону : РГСУ, 2015. — 89 с.

References

1. Morrison, J. Sustainable development. London: Profile Books, 2002, 370 p.

2. Bezuglaya, E.Y. Klimaticheskie kharakteristiki usloviy rasprostraneniya primesey v atmosphere. [Climatic characteristics of conditions for atmospheric contaminants spread.] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 328 p. (in Russian).

3. Berlyand, M.E. Sovremennye problemy atmosfernoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery. [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution.] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 448 p. (in Russian).

4. Sonkin, L.R. Sinoptiko-statisticheskiy analiz i kratkosrochnyy prognoz zagryazneniya atmosfery. [Synoptic and statistical analysis and short period forecast of atmospheric pollution.] Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 223 p (in Russian).

5. Boettger, C.-M. Air-pollution potential East of the Rocky Mountains — Fall 1959. Bulletin of the American Meteorological Society, 1961, vol. 42, pp. 615–620.

6. Boettger, C.-M., Smitth, H.-J. The Nashville daily air pollution forecast. Monthly Weather Review, 1961, vol. 89, no. 11, pp. 477–481.

7. Arkhiv pogody v Sankt-Peterburge. [Weather archive in St. Petersburg.] Available at: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Санкт-Петербурге (accessed 03.11.17) (in Russian).

8. Karty pogody. [Weather maps.] Available at: http://meteoweb.ru/ (accessed 03.11.17) (in Russian).

9. Serebritskiy, I.A., ed. Okhrana okruzhayushchey sredy, prirodopol'zovanie i obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti v 2014 godu. [Environment protection, nature management, and ecological safety in 2014.] St. Petersburg: Sezam-print, 2015, 404 p. (in Russian).

10. Okhrana prirody. Atmosfera. Rukovodstvo po prognozu zagryazneniya vozdukha. RD 52.04.306-92. [RD 52.04.306-92. Nature protection. Atmosphere. Guidance on air pollution forecast.]USSR Committee for meteorology. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993, 104 p. (in Russian).

11. Lazareva, E.O., Popova, E.S., Lipovitskaya, I.N. Vliyanie temperaturnykh inversiy na kontsentratsiyu primesey v prizemnom sloe vozdukha nad Sankt-Peterburgom v 2006–2014 gg. [The influence of temperature inversions on the concentration of impurities in the surface layer of air in St. Petersburg during the period of 2006-2014.] Uchenye zapiski RGGMU, 2015, no. 41, pp. 149–155 (in Russian).

12. Lazareva, E.O. Skhema utochneniya k modeli prognozirovaniya rasseivaniya antropogennykh primesey atmosfernogo vozdukha dlya g. Sankt-Peterburg. [Specification design to the model for predicting dispersion of anthropogenic impurities of atmospheric air for St. Petersburg.] Natural and Technical Sciences Journal, 2016, no. 3, pp. 104–108 (in Russian).

13. Lazareva, E.O. Zagryaznenie atmosfernogo vozdukha g. Sankt-Peterburg pri razlichnykh sinopticheskikh situatsiyakh: avtoref. dis. … kand. geogr. nauk. [Atmospheric air pollution in St. Petersburg under various synoptic situations: Cand.Sci. (Geography) diss., author's abstract.] St. Petersburg, 2016, 144 p. (in Russian).

14. Yevstropov, V.M. Sistemnye aspekty vzaimodeystviya ob"ektov i sredy v tekhnosfernom prostranstve. [System aspects of interaction of objects and environment in the technosphere space.] Rostov-on-Don: RGSU, 2015, 89 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.07.2017
Сдана в редакцию 11.07.2017
Запланирована в номер 15.09.2017

Received 10.07.2017
Submitted 11.07.2017
Scheduled in the 15.09.2017

Об авторах:

Лазарева Елена Олеговна,
специалист-синоптик Санкт-Петербургской метеорологической станции, кандидат географических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0034-5730
milyutina.e.o@yandex.ru

Authors:

Lazareva, Elena O.,
a weather forecast specialist of St. Petersburg Meteorological Station, cand.Sci. (Geography),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0034-5730
milyutina.e.o@yandex.ru

Липовицкая Ирина Николаевна,
проректор по развитию Санкт-Петербургского института гуманитарного образования (РФ, 190020, г. Санкт-Петербург, ул. Лифляндская, 4), кандидат географических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3805-4253
lipovitskaya@mail.ru

Lipovitskaya, Irina N.,
pro-rector for Development, Saint-Petersburg Institute of Education in the Sphere of Humanities and Social Sciences (RF, 190020, Saint-Petersburg, Liflyandskaya St., 4), Cand.Sci. (Geography),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3805-4253
lipovitskaya@mail.ru

Андреева Елена Сергеевна,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защиты окружающей среды» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор географических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7087-1870
esameteo@mail.ru

Andreeva, Elena S.,
professor of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Geography), associate professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7087-1870
esameteo@mail.ru

Ефимова Юлия Викторовна,
доцент кафедры «Метеорологические прогнозы» Российского государственного гидрометеорологического университета (РФ, 119021, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, 98), кандидат географических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3920-8103
luluef@mail.ru

Efimova, Yulia V.,
associate professor of the Meteorological Forecasts Department, Russian State Hydrometeorological University (RF, 119021, St.Petersburg, Malookhtinsky prospect, 98), Cand.Sci. (Geography),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3920-8103
luluef@mail.ru

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621.9.06:628.5 10.23947/1992-5980-2017-17-4-151-157

Распределение вибраций по несущей системе станков при шарико-стержневом упрочнении узлов колесных пар*

Н. И. Стуженко[1], М. А. Тамаркин[2]**

[1] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Российская Федерация

[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Vibration distribution over support system of machine tools under ball-rod hardening of wheelpair assemblies ***

N. I. Stuzhenko[1], M. A. Tamarkin[2]**

[1] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Звуковое поле в рабочей зоне операторов оборудования (в частности, при шарико-стержневом упрочнении узлов колесных пар) формируется одновременным излучением звуковой энергии из двух источников. Первый: акустическая подсистема «упрочняемая заготовка — упрочнитель». Второй: все элементы несущей системы станков — в частности, корпуса шпиндельных бабок, станины и т. д. При измерении уровней звукового давления определить вклад каждого отдельного источника практически невозможно, поэтому необходимо провести экспериментальные исследования распределения вибраций по всей несущей системе станка — как на холостом ходу, так и при реализации технологического процесса.

Материалы и методы. Измерения уровней вибраций проводились при определенных технологических операциях. Обработка поверхностей катания выполнялась на колёсотокарном станке, на котором вместо режущего инструмента устанавливались шарико-стержневые упрочнители. Упрочнение посадочных поверхностей осей колесных пар выполнялось на специальном осетокарном станке, на котором вместо резцов устанавливались шарико-стержневые упрочнители. Упрочнение посадочной поверхности колеса выполнялось на токарно-карусельном станке. Во всех этих случаях измерялись октавные уровни вибрации на холостом ходу и в процессе упрочнения. Сравнение спектров вибраций со спектрами шума позволяет косвенно определить долевой вклад элементов несущей системы станка в звуковое поле на рабочих местах операторов.

Результаты исследования. Цель исследований, результаты которых приведены в данной статье, заключалась в изучении закономерностей распределения уровней вибрации по элементам несущих систем оборудования шарико-стержневого упрочнения колесных пар. Качественная оценка долевого вклада каждого источника (упрочняемая деталь, упрочнитель и элементы несущей системы) может быть выполнена на основе сравнения спектров шума и вибрации. Измерения проводились на трех типах станков: специальном колёсотокарном, на котором упрочняется поверхность катания; специальном

Introduction. Acoustic field in the allowable zone of the equipment operators, and, in particular, under ball-rod hardening of wheelpairs, is generated by the simultaneous emission of sound energy from two sources. The first one is the acoustic subsystem of “hardenable workpiece – reinforcer”. The second source includes all elements of the supporting machine system, in particular, spindle head housings, foundation slab, etc. When measuring sound pressure levels, it is practically impossible to detect the contribution from each separate source, therefore it is needed to carry out experimental studies on the distribution of vibrations throughout the entire machine carrier system both at idle speed and under the process implementation.

Materials and Methods. Measurements of the vibration levels were carried out under certain technological operations. Roll surface machining was performed on a wheel-turning lathe on which ball-rod reinforcers were installed instead of cutting tools. Hard-facing of the landing surfaces of the wheelpair axles was carried out on a purpose-designed axle turning lathe on which the ball-rod reinforcers were installed in place of the cutters. Hard-facing of the wheel landing surface was carried out on a boring-and-turning lathe. In all these cases, octave vibration levels were measured at idle and under hardening. Comparison of the vibration spectra and noise spectra makes it possible to determine implicitly the contribution of the machine carrier system elements to the sound field at the operators' workplaces.

Research Results. The research objectives, the results of which are given, consisted in studying the regularities in the distribution of vibration levels throughout the elements of the bearing systems of the ball-rod hardening equipment for wheelpairs. A qualitative assessment of the contribution of each source (hardenable part, reinforcer, and elements of the supporting system) can be performed on the basis of comparing the noise and vibration spectra. Measurements were carried out on three types of machines: special wheel-turning lathe on which the rolling surface is hardened; purpose-designed axle turning lathe on which the landing surface

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: n.stuzhenko@mail.ru, tehn_rostov@mail.ru

**The research is done within the frame of the independent R&D.

осетокарном, на котором упрочняется посадочная поверхность оси колесной пары; токарно-карусельном, на котором упрочняется отверстие колеса.
Обсуждение и заключение. Результаты измерений вибраций показали, что интенсивность звукового излучения элементов несущей системы станков не создает превышений над санитарными нормами шума. Таким образом, разработка системы шумовиброзащиты может быть ограничена подсистемой «упрочняемая заготовка — упрочнитель».

of the wheelpair axle is strengthened; and boring-and-turning lathe on which the wheel opening is reinforced.
Discussion and Conclusions. The results of vibration measurements show that the intensity of sound emission of the machine carrier system elements does not cause excess over the sanitary norms of noise. Thus, the development of a noise-vibration protection system can be limited to the "hardenable workpiece – reinforcer" subsystem.

Ключевые слова: вибрация, шарико-стержневое упрочнение, колесные пары.

Keywords: vibration, ball-rod hardening, wheelpairs.

Образец для цитирования: Стуженко, Н. И. Распределение вибраций по несущей системе станков при шарико-стержневом упрочнении узлов колесных пар / Н. И. Стуженко, М. А. Тамаркин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 151–157.

For citation: N.I. Stuzhenko, M.A. Tamarkin.. Vibration distribution over support system of machine tools under ball-rod hardening of wheelpair assemblies. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 151–157.

Введение. При измерениях уровня звукового давления в рабочей зоне операторов чрезвычайно затруднительно оценивать долевой вклад отдельных источников в звуковое поле, поскольку все они одновременно излучают звуковую энергию. Поэтому была проведена серия экспериментов, позволившая детально изучить распределение вибраций по несущей системе колёсотокарного станка. Измерения спектров вибраций производилось согласно методам, представленным в работах [1–10].

Основная часть. Пьезоакселерометр устанавливался непосредственно на основные излучающие звук поверхности станка и упрочнитель. Колесная пара при упрочнении вращается, поэтому уровень вибрации на самих колесах и оси колесной пары не измерялся.

Результаты измерений приведены на рис. 1.

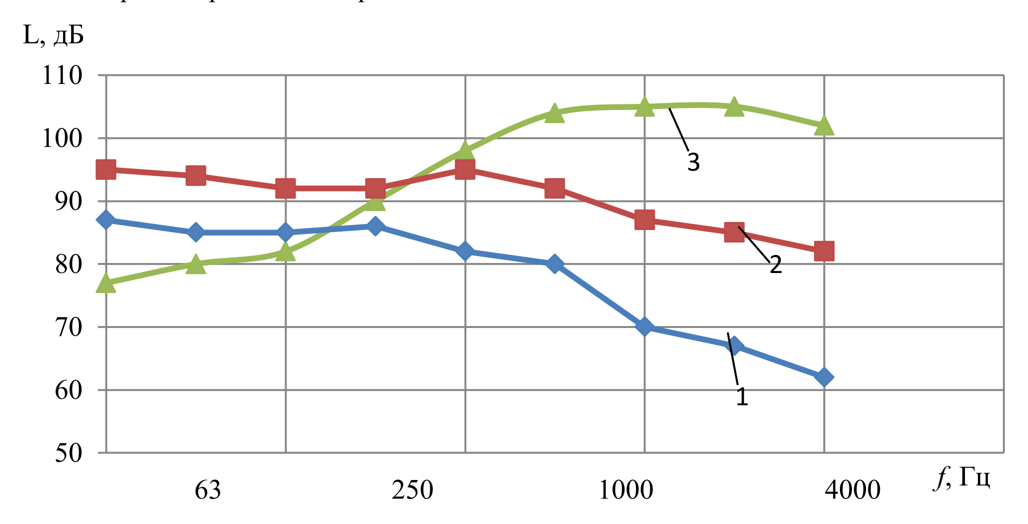


Рис. 1. Спектры вибраций на элементах колесотокарного станка: 1 — на станине; 2 — на крышке переднего шпиндельного подшипника; 3 — на упрочнителе

Fig. 1. Vibration spectra on wheel-turning lathe elements: 1 - on frame; 2 - on front spindle bearing cover; 3 - on hardener

Отметим, что для сравнения спектров измерения вибрации производились не в нормируемом диапазоне вибраций (4–63 Гц) и звуковых частот.

Минимальные уровни вибрации в диапазоне 500–8000 Гц (недопустимом по санитарным нормам) не превышают 80 дБ. Они на 8–20 дБ ниже, чем на крышке шпиндельного подшипника, и носят низкочастотный характер. Характер спектра вибрации на крышке подшипника среднечастотный.

Спектр же вибрации на корпусе упрочнителя — ярко выраженный высокочастотный и по характеру спектрального состава соответствует спектрам шума.

Распределение вибраций на корпусах шпиндельной бабки приведено на рис. 2 и в таблице 1.

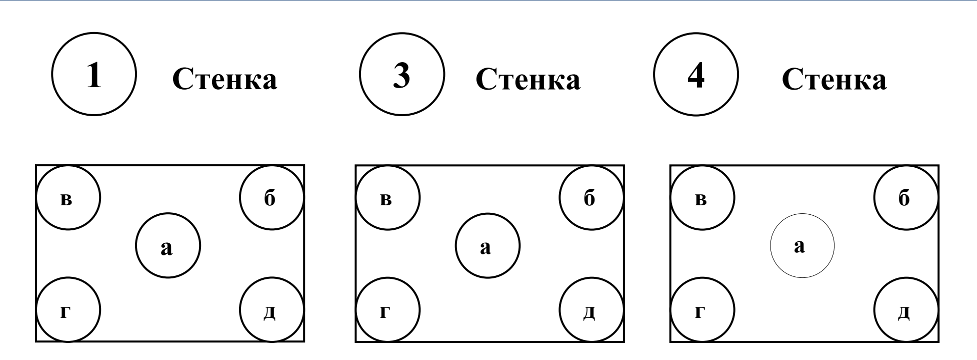


Рис. 2. Схема расположения точек измерения вибраций

Fig. 2. Layout chart of vibration measure points

Таблица 1

Table 1

Распределение вибраций по корпусу шпиндельной бабки

Vibration distribution over spindle case

Частота, Гц										
Точка № 1										
	а		б		в		г	д		
63	95,4	94,5	90,4	90,1	97,4	97,5	92,3	86,6	86,8	
125	94,5	94,0	90,4	90,4	95,5	95,7	91,5	87,9	87,2	
250	93,7	93,7	92,8	92,8	95,0	95,0	90,4	90,2	90,3	
500	93,0	93,1	94,0	94,1	93,4	93,6	90,7	89,9	90,1	
1000	96,2	96,1	97,7	97,6	94,3	94,8	92,7	93,8	94,1	
2000	84,5	84,9	87,1	87,2	84,2	84,4	81,0	83,3	83,5	
4000	85,2	85,8	80,6	80,5	79,1	78,6	83,7	86,4	85,9	
8000	80,8	80,9	84,8	84,8	80,7	80,3	75,3	81,0	80,1	
Точка № 3										
	а		б	в		г		д		
63	89,8	90,2	97	99,3	99,0	85,7	85,3	90,3	89,3	
125	87,9	87,5	98,5	96,4	96,1	85,3	84,7	88,4	87,6	
250	89,0	88,6	96,5	94,7	94,4	85,8	85,6	89,1	87,6	
500	85,1	84,9	89,5	88,9	88,8	82,7	82,5	83,2	82,3	
1000	83,6	83,1	91,7	89,9	89,9	84,2	83,5	82,4	81,0	
2000	83,1	83,1	95,9	93,4	93,4	86,5	85,6	81,7	80,7	
4000	81,1	80,8	84,2	84,3	84,3	81,5	81,2	80,9	79,4	
8000	74,3	73,7	81,6	80,4	80,8	74,5	75,2	75,9	75,9	
Точка № 4										
	а		б		в		г		д	
63	91,3	91,2	93,0	92,0	90	92	90	91	93	92
125	88,5	88,3	88,6	88,5	87	88	87	88	87	86
250	89,3	88,6	90,4	90,7	88	89	90	92	90	91
500	85,9	85,6	87,3	87,4	85	84	86	87	88	89
1000	86,2	85,9	84,5	84,9	87	86	84	85	81	83
4000	75,5	74,2	71,6	71,8	72	71	70	72	73	74
8000	74,9	73,2	67,2	67,1	63	70	72	73	70	72

В основном вибрации распределяются по элементам корпуса шпиндельной бабки в соответствии с закономерностями, характерными для традиционных токарных станков, оснащенных зубчатым приводом. Однако есть и

существенное отличие. При данном технологическом процессе разница между уровнями вибраций на холостом ходу и при упрочнении не превышает 2 дБ. Это объясняется тем, что при шарико-стержневом упрочнении на реализацию процесса затрачивается значительно меньшая мощность привода, чем на процесс резания. Формирование спектров шума при шарико-стержневом упрочнении осей колесных пар незначительно отличается от описанных выше закономерностей при упрочнении колес (рис. 3).

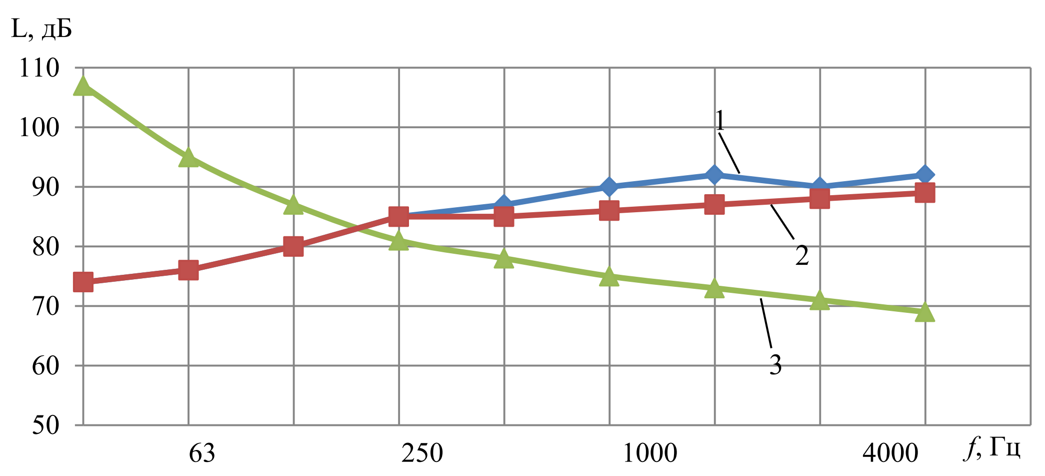


Рис. 3. Спектры шума при упрочнении осей колесных пар: 1 — натяг, 5 мм; 2 — натяг, 2,5 мм; 3 — предельный спектр

Fig. 3. Noise spectra under wheelpair axle hardening: 1 - interference, 5 mm; 2 - interference, 2.5 mm; 3 - limitary spectrum

Распределение вибраций согласно схеме (рис. 4) приведено в табл. 2.

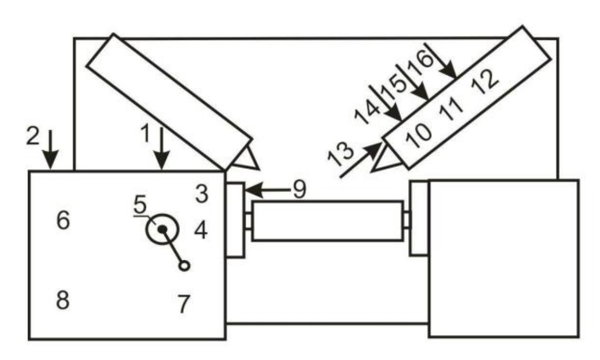


Рис. 4. Точки измерения вибраций осетокарного станка

Fig. 4. Vibration measure points of axle turning lathe

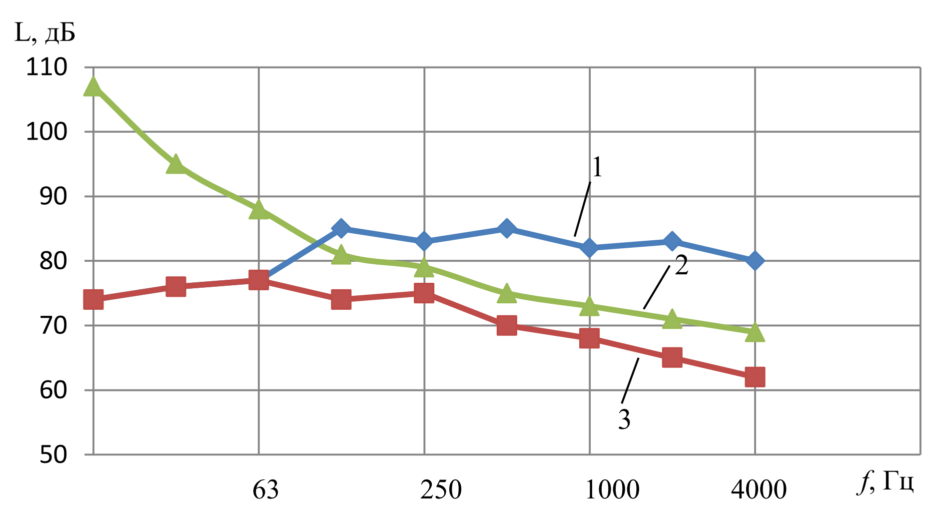


Рис. 5. Спектры шума при упрочнении колеса: 1 — рабочий режим; 2 — холостой ход станка; 3 — предельный спектр

Fig. 5. Noise spectra under wheel hardening: 1 - operating mode; 2 – machine idle running; 3 - limitary spectrum

Таблица 2
Table 2

Распределение вибраций по несущей системе осетокарного станка

Vibration distribution over support system of axle turning lathe

№ точки	Уровни виброскорости (дБ) в октавных интервалах частот (Гц)								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	89	92	91	93	94	96	97	90	82
2		92	92	93	94	97	97	90	84
3		89	91	91	94	97	97	90	82
4		89	90	92	94	97	97	90	81
5		87	90	92	94	97	97	92	94
6		89	90	92	94	97	97	91	92
7		87	90	92	94	97	97	90	82
8		90	91	91	94	97	97	90	83
9		91	91	93	94	97	97	90	83
10		88	89	92	94	95	94	90	80
11		88	89	92	94	95	94	90	80
12		91	91	93	94	95	95	90	80
13		89	90	92	95	96	96	90	80
14		89	89	91	94	96	96	89	80
15		90	91	92	94	96	95	90	80
16		89	91	92	93	96	96	90	80

В отличие от колёсотокарного станка, в этом случае на узлах с упрочнителем наблюдается значительное увеличение уровней вибрации (в точках 10–16). На несущей системе станка изменений в уровнях вибраций не наблюдается.

Значительно менее шумным является технологический процесс шарико-стержневого упрочнения отверстий колес (рис. 5).

Колесо устанавливалось на столе станка, и его внешняя поверхность закрывалась резиновой пластиной толщиной 20 мм. Уровень звукового давления в значительно большей степени превышается за счет звукового излучения упрочнителя и воздушной полости отверстия. Как показали измерения, превышение уровней звукового давления составляет 80–10 дБ. Повышенный уровень шума на частоте 250 Гц также обусловлен работой компрессора.

Результаты измерения уровней вибрации на корпусе компрессора приведены на рис. 6.

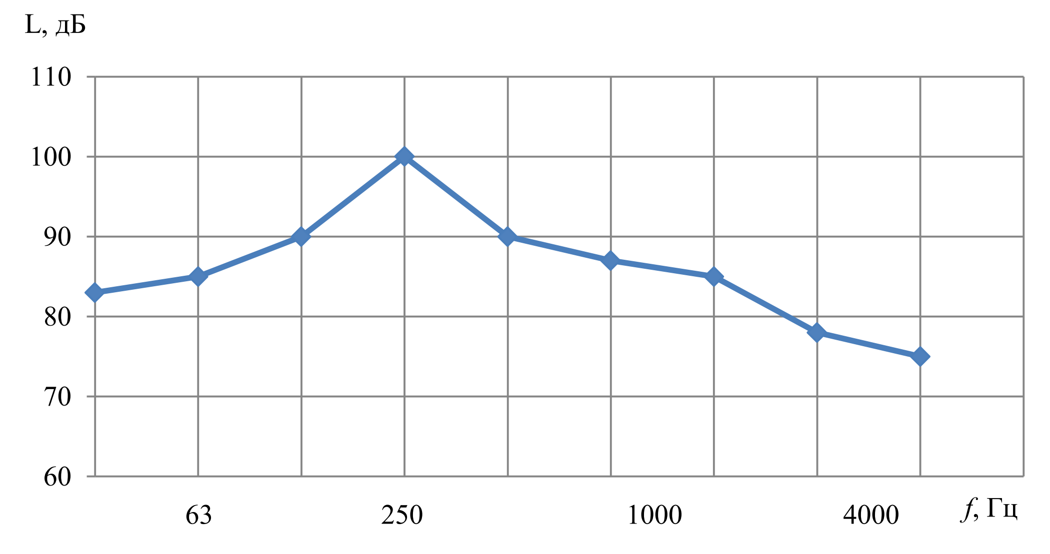


Рис. 6. Спектр вибраций корпуса компрессора

Fig. 6. Vibration spectrum of compressor case

В отличие от распределения вибраций на корпусных деталях станков, компрессор имеет четко выраженный максимум на частоте 250 Гц, что подтверждает измерения уровней звукового давления. Такой спектр близок к тональному, т. к. во всех остальных октавах уровни вибрации ниже на 10 дБ (третья и четвертая октавы) и более.

Выводы. Результаты измерений показали, что во всех трех типах станков элементы несущей системы (шпиндельные бабки, станины) практически не влияют на превышение санитарных норм по уровням звукового давления. Полученные данные имеют значительную практическую ценность, т. к. позволяют ограничить мероприятия по снижению шума средствами шумозащиты системы «упрочняемое изделие — упрочнитель».

Библиографический список

1. Шумомеры. Часть 1. Технические требования : ГОСТ 17187-2010 [Электронный ресурс] / ГОСТы, СНиПы, СанПиНы и др. Образовательный ресурс. — Режим доступа: http://www.g-ost.ru/51675.html (дата обращения: 12.10.17).

2. Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению : Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 января 2014 г. № 33н [Электронный ресурс] / Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации. — Режим доступа: http://www.rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/170.html (дата обращения: 12.10.17).

3. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах : Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО 9612-2013 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 42 с.

4. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54500.3-2011/ Руководство ИСОМЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2012. — 76 с.

5. О специальной оценке условий труда : федер. закон [Электронный ресурс] / Государственная Дума ; Совет Федерации. — Режим доступа: http://www.rg.ru/2013/ 12/30/ocenka-dok.html (дата обращения: 12.10.17).

6. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки : СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [Электронный ресурс] / Госкомсанэпиднадзор РФ. — Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/901703278.html (дата обращения: 12.10.17).

7. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий : СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [Электронный ресурс] / Госкомсанэпиднадзор РФ. — Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/90170328.html (дата обращения: 12.10.17).

8. Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки : СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [Электронный ресурс] / Госкомсанэпиднадзор РФ. — Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200029239.html (дата обращения: 12.10.17).

9. Чукарин, А. Н. Улучшение условий труда операторов высокоскоростных прутковых токарных станков за счет снижения шума / А. Н. Чукарин, В. А. Минко, Т. А. Финоченко. — Ростов-на-Дону. — Изд. центр ДГТУ, 2012. — 140 с.

10. Стуженко, Н. И. Экспериментальные исследования спектров шума процесса шарико-стержневого упрочнения узлов колесных пар / Н. И. Стуженко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — № 1 (88). — С. 92–98.

Reference

1. Shumomery. Chast' 1. Tekhnicheskie trebovaniya: GOST 17187-2010. [State standard 17187-2010. Sound level meters. Part 1. Technical requirements.] Available at: http://www.g-ost.ru/51675.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

2. Ob utverzhdenii Metodiki provedeniya spetsial'noy otsenki uslo-viy truda, Klassifikatora vrednykh i (ili) opasnykh proizvodstvennykh faktorov, formy otcheta o provedenii spetsial'noy otsenki usloviy truda i instruktsii po ee zapolneniyu: Prikaz Ministerstva truda i sotsial'noy zashchity RF ot 24 yanvarya 2014 g. № 33n. [On approval of Methodology for special assessment of working conditions, Classifier of occupational and (or) process safety hazards, reporting form on special evaluation of working conditions and its completion guidelines: Order of Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation of January 24, 2014, no. 33n] Available at: http://www.rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/170.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

3. Akustika. Izmereniya shuma dlya otsenki ego vozdeystviya na chelove-ka. Metod izmereniy na rabochikh mestakh: Natsional'nyy standart RF GOST R ISO 9612-2013. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. [National Standard RF GOST R ISO 9612-2013. Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Method of measurements at workplaces.] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2014, 42 p. (in Russian).

4. Natsional'nyy standart RF GOST R 54500.3-2011/ Rukovodstvo ISOMEK 98-3:2008. Neopredelennost' izmereniya. Chast' 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu reguliro-

vaniyu i metrologii. [National Standard RF GOST R 54500.3-2011. ISO/ IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement.] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Moscow: Standartinform, 2012, 76 p. (in Russian).

5. O spetsial'noy otsenke usloviy truda: feder. zakon. [On special assessment of working conditions: Federal law.] Available at: http://www.rg.ru/2013/ 12/30/ocenka-dok.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

6. Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloy zastroyki: SN 2.2.4/2.1.8.562-96. [Noise at workplaces, in residential and public buildings, and on residential development territory: SN 2.2.4/ 2.1.8.562-96.] SCSES RF. Available at: http://docs.cntd.ru/document/901703278.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

7. Proizvodstvennaya vibratsiya, vibratsiya v pomeshcheniyakh zhilykh i ob-shchestvennykh zdaniy: SN 2.2.4/2.1.8.566-96. [Industrial vibration, vibration in premises of residential and public buildings: SN 2.2.4 / 2.1.8.566-96.] SCSES RF. Available at: http://docs.cntd.ru/document/90170328.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

8. Infrazvuk na rabochikh mestakh, v zhilykh i obshchestvennykh pomeshche-niyakh i na territorii zhiloy zastroyki: SN 2.2.4/2.1.8.566-96. [Infrasound at workplaces, in residential and public premises and on residential development territory: SN 2.2.4/2.1.8.566-96.] SCSES RF. Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200029239.html (accessed: 12.10.17) (in Russian).

9. Chukarin, A.N., Minko, V.A., Finochenko, T.A. Uluchshenie usloviy truda operatorov vysokoskorostnykh prutkovykh tokarnykh stankov za schet snizheniya shuma. [Improving the working conditions of operators of high-speed bar lathes through reducing noise.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 140 p. (in Russian).

10. Stuzhenko, N.I. Eksperimental'nye issledovaniya spektrov shuma protsessa shariko-sterzhnevogo uprochneniya uzlov kolesnykh par. [Experimental studies on noise spectra of ball-rod hardening of wheel pair assemblies.] Vestnik of DSTU, 2017, no. 1 (88), pp. 92–98 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.09.2017
Сдана в редакцию 12.09.2017
Запланирована в номер 15.10.2017

Received 12.09.2017
Submitted 12.09.2017
Scheduled in the 15.10.2017

Об авторах:

Стуженко Наталья Игоревна,
старший преподаватель кафедры «Строительство и техносферная безопасность» Института сферы обслуживания и предпринимательства Донского государственного технического университета (РФ, 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7724-3156
n.stuzhenko@mail.ru

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Authors:

Stuzhenko, Natalya I.,
senior lecturer of the Construction and Technosphere Safety Department, Institute of Service and Business (DSTU branch), (RF, 346500, Shakhty, Shevchenko St., 147),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7724-3156
n.stuzhenko@mail.ru

Tamarkin, Mikhail A.,
head of the Engineering Technology Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
tehn_rostov@mail.ru